



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**ANALISIS PRELIMINAR DE UN SISTEMA
GENERADOR DE HIDROGENO UTILIZANDO
HIDROCARBUROS Y EL APROVECHAMIENTO DEL
SITIO DE LAGUNA VERDE**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO ELECTRICO Y ELECTRONICO
(AREA ELECTRICA)**

**PRESENTA:
ALAIN FLORES Y FLORES**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JUAN LUIS FRANCOIS LACOUTURE**



CIUDAD UNIVERSITARIA MEXICO, D. F.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

"Si he llegado tan alto es por que me encuentro parado sobre hombros de gigantes" así es como Sir Isaac Newton justifico de alguna manera el éxito de sus descubrimientos; se pensaría que la realización de este trabajo fue desarrollado sólo por mi, pero para poderlo desarrollar y llegar hasta esta etapa de mi vida fue necesario de muchas personas, de muchos gigantes; entre las cuales se encuentran mis padres la Sra. Cristina María del Carmen Flores Anaya y el Sr. José Guadalupe Margarito Flores Rodríguez a quienes les dedico esta tesis como una muestra de la culminación de toda su confianza, enseñanza y valores que colocaron en mi.

Una persona fundamental e irremplazable en este trabajo y en muchos aspectos actuales y sin duda futuros de mi vida es mi director de tesis y actual tutor el Dr. Juan Luis François Lacouture quien me guío y confío en mi para desarrollar este trabajo, le agradezco también su dedicación, motivación y paciencia, también quisiera agradecerle a mis hermanas Nadia y Aydee.

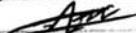
A la Dra. Cecilia Martín del Campo por sus aportaciones y enriquecimiento a la tesis y al Ingeniero Alejandro Cortés Carmona por facilitarme el acceso a material referente al sitio de Laguna Verde y considerarme su amigo.

Agradezco de igual manera a mis familiares y compañeros, que siempre se encontraron a mi lado, a todos los profesores que tuvieron la paciencia y me ofrecieron un momento de su vida para transmitirme sus vivencias y conocimientos, a la facultad de ingeniería por aceptarme en sus aulas y a esta hermosa universidad a quien le debo tanto, aquí encontré amistad, conocimiento, enseñanza, tolerancia y libertad; le debo tanto, que mis actos serán muestra de agradecimiento hacia ella.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Alain Flores y Flores.

FECHA: 23 - Febrero - 2004

FIRMA: 

"...Sí, amigos míos, yo creo que el agua será empleada algún día como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno que la constituyen, utilizados aislada o simultáneamente, suministrarán una fuente de luz y calor inagotables, dotada de una intensidad de la que carece la hulla. Algún día los pañoles de los vapores y los tender de las locomotoras irán cargados de esos dos gases comprimidos que se quemarán en las calderas con una enorme potencia calorífica. Así, pues, nada que temer. Mientras la tierra esté habitada, dará satisfacción a las necesidades de los habitantes. Estos nunca carecerán de luz ni de calor, como tampoco de las producciones de los reinos vegetal, mineral y animal. Creo que cuando se agoten los yacimientos de hulla, se obtendrá el calor con el agua. El agua es el carbón del futuro."

Fragmento de "La Isla Misteriosa", escrita por Julio Verne en 1870.

CONTENIDO.

Lista de figuras.	III
Lista de tablas.	V
Lista de acrónimos.	VI
Introducción	1
1. Métodos de producción de hidrógeno.	6
1.1. Principales fuentes de hidrógeno	6
1.2. Descomposición electroquímica o electrólisis.	8
1.3. Descomposición térmica directa.	8
1.4. Ciclos termoquímicos.	8
1.5. Biofotólisis.	10
1.6. Reformado de metano con vapor.	10
1.6.1. Balances de masa y energía para el proceso de reformado de metano con vapor.	12
1.7. Oxidación parcial.	14
1.8. Ruptura Térmica.	14
1.9. Comparación de los métodos de producción de hidrógeno.	14
2. Revisión y selección de los tipos de reactores nucleares para la producción de hidrógeno.	16
2.1. Reactores de agua presurizada (PWR)	18
2.2. Reactores de agua hirviendo (BWR)	19
2.3. Reactores de agua pesada presurizada (PHWR o CANDU)	20
2.4. Reactor avanzado enfriado por gas (AGR)	21
2.5. Reactor de agua ligera, moderado con grafito (RBMK)	22
2.6. Reactores avanzados.	23
2.7. Diseños avanzados.	25
2.8. Reactores refrigerados por agua.	25
2.9. Reactores rápidos.	28
2.10. Reactores refrigerados por gas.	29
2.11. Reactor modular cama de esferas. (PBMR)	31
2.11.1. Funcionamiento del reactor.	32
2.11.2. Operación de la unidad de conversión de energía.	33
3. Análisis de las zonas productoras de hidrocarburos del estado de Veracruz.	35
3.1. Producción de hidrocarburos en la región norte.	35
3.2. Producción de gas natural.	36
3.3. Principales instalaciones petroleras del estado de Veracruz.	38

4. Análisis del sitio de Laguna Verde.	41
4.1. Producción de hidrógeno.	44
4.2. Análisis del accidente de incendio del hidrógeno almacenado.	46
5. Análisis económico.	55
6. Conclusiones.	58
Referencias.	60
ANEXO A	62

LISTA DE FIGURAS.

A.	Esquema de producción de energía eléctrica a partir del gas natural.	2
B.	Producción del hidrógeno a partir de diferentes fuentes de energía primaria.	3
C.	Principales usos actuales del hidrógeno.	3
1.1.	Fuentes y producción de hidrógeno.	6
1.2.	Proceso SI en el cual se obtienen hidrógeno y oxígeno.	9
1.3.	Esquema gráfico del proceso de reformado.	12
1.4.	Esquema de una planta de reformado de metano con vapor, con balance de masas.	13
2.1.	Diagrama del reactor de agua presurizada (PWR)	19
2.2.	Reactor de agua hirviente (BWR)	20
2.3.	Reactor de agua pesada presurizada (PHWR o CANDU)	21
2.4.	Reactor avanzado enfriado por gas (AGR)	22
2.5.	Reactor de agua ligera, moderado con grafito (RBMK)	23
2.6.	HTGR acoplado a un turbogenerador.	29
2.7.	Combustible del HTGR.	30
2.8.	Comparación del combustible del PBMR con una pelota de tenis.	31
2.9.	El AVR en Jülich operando.	31
2.10.	Esquema de generación utilizando el PBMR (Ciclo Brayton)	33
3.1.	Representación gráfica de la producción de hidrocarburos por región.	36
3.2.	Gráfica en la que se muestra la variación del precio del gas natural a través del tiempo. (en pesos del 2001)	38
3.3.	Instalaciones petroleras del estado de Veracruz.	39
3.4.	Red de ductos y centros procesadores de gas del estado de Veracruz.	40
4.1.	Mapa de la CNLV (3 Km.)	41
4.2.	Sitio de Laguna Verde	42
4.3.	Laguna Verde y zona de edificios de la central.	43
4.4.	Zona de descarga de la central.	44
4.5.	Balance de masas para 55 MJ.	45
4.6.	Balance de masas para 1 MWh, utilizando el método tradicional de reformado de vapor con metano.	45
4.7.	Balance de masas para 1Mwh, utilizando un reactor nuclear para suministrar la energía requerida para el proceso de reformado de vapor con metano.	46
4.8.	Balance de masas y energía para producir 1,484 Tons. de hidrógeno por cada hora, es decir 13 mil Tons. de hidrógeno al año.	46
4.9.	Gráfica comparativa del flujo de calor propano e hidrógeno m=13 mil Tons.	48
4.10.	Gráfica comparativa del flujo de calor propano e hidrógeno m=5 mil Tons.	49
4.11.	Gráfica comparativa del flujo de calor propano e hidrógeno m=2.5 mil Tons.	50
4.12.	Resultados de radiación de calor para una distancia de 1.5 Km y diferentes masas.	52

4.13.	Resultados de radiación de calor para una distancia de 1 Km y diferentes masas.	53
5.1.	Prospecto de costo, incluyendo costo de manejo de CO ₂	56

LISTA DE TABLAS.

1. Características de algunos procesos de producción de hidrógeno.	15
2. Diferentes tipos de reactores.	17
3. Temperaturas alcanzadas por algunos reactores.	23
4. Reservas y producción de hidrocarburos en la Región Norte.	36
5. Producción de gas natural por zonas desde 1991 hasta 2001.	37
6. Precios del gas natural y gas licuado desde 1991 hasta 2001.	37
7. Producción de hidrógeno de PEMEX.	40
8. Variables y sus unidades para el análisis de flujo de radiación de calor.	47
9. Resultados del análisis de flujo de radiación de calor, para la misma masa de hidrógeno y propano y diferentes distancias (13 mil Tons.)	48
10. Resultados del análisis de flujo de radiación de calor, para la misma masa de hidrógeno y propano y diferentes distancias (5 mil Tons.)	49
11. Resultados del análisis de flujo de radiación de calor, para la misma masa de hidrógeno y propano y diferentes distancias (2.5 mil Tons.)	50
12. Efectos del flujo de calor en la salud humana y la central.	51
13. Resultados del análisis del flujo de radiación de calor, para 1.5 Km. y diferentes masas.	52
14. Resultados del análisis del flujo de radiación de calor, para 1 Km. y diferentes masas.	53
15. Comparación de costos para el proceso SI y de reformado.	55

LISTA DE ACRONIMOS.

HTGR	Reactor de Alta Temperatura Refrigerado por Gas.
ABWR	Reactor Avanzado de Agua Hirviente.
AGR	Reactor Avanzado Enfriado por Gas.
BWR	Reactor de Agua Hirviente.
HTTR	Reactor de Prueba de Alta Temperatura.
MSR	Reformado de Metano con Vapor.
PBMR	Reactor Modular de Cama de Esferas.
PEMEX	Petróleos Mexicanos.
PHWR o CANDU	Reactor de Agua Pesada Presurizada.
PWR	Reactor de Agua Presurizada.
RBMK	Reactor de Agua Ligera moderado con Grafito.
SI	Azufre – Yodo.
SOFC	Celdas de Combustible de Oxido Sólido.
LWR	Reactor de Agua Ligera.
HWR	Reactor de Agua Pesada.
ALWR	Reactor Avanzado de Agua Ligera.
INFCE	Evaluación Internacional del Ciclo de Combustible.
MOX	Mezcla de Oxidos.
LMFR	Reactor Rápido Refrigerado por Metal Líquido.
ALMFR	Avanzado Reactor Rápido Refrigerado por Metal Líquido.
EFR	Reactor Rápido Europeo.
HTGR	Reactor de Alta Temperatura Refrigerado por Gas.
HTR	Reactor de Alta Temperatura.
CNLV	Central Nuclear Laguna Verde.
MHR	Reactor Modular Enfriado por Helio
PVC	Policloruro de Vinilo
CFE	Comisión Federal de Electricidad.
GT-MHR	Turbina de Gas Acoplada a un Reactor Modular Enfriado por Helio.
BLEVE	Explosión de Vapor debido a la Expansión de un Líquido Hirviente.

INTRODUCCION

En los últimos tres decenios, la población mundial casi se ha duplicado y continuará en aumento. Según las estimaciones actuales, en el año 2020 habitarán en este planeta unas 8100 millones de personas, y casi el 90% del incremento de la población se registrará en los países en desarrollo [1]. El consumo actual de electricidad por habitante en estos países, que puede utilizarse como indicador del nivel de vida, es muy bajo, en uno o dos órdenes de magnitud inferior al de los países industrializados. Además de las numerosas necesidades urgentes, tales como los alimentos, la vestimenta, el alojamiento y el trabajo, la disponibilidad de energía es un requisito previo importante para el desarrollo socioeconómico en todas las partes del mundo.

Dependiendo de la ubicación geográfica y el nivel de industrialización, la energía final se consume de distintas maneras: como electricidad, para el transporte, como trabajo mecánico o como fuente de calor. Entre las distintas fuentes energéticas de que disponen algunos países, la energía nucleoelectrica representa una de las pocas opciones que permite producir energía en todas sus formas, es decir, como electricidad, calor industrial en régimen de baja y alta temperatura y vapor industrial, en forma económica y en condiciones ambientalmente aceptables. Las preocupaciones respecto de los efectos ambientales del quemado de combustibles fósiles para la producción de energía han fomentado el interés por las fuentes de energía poco contaminantes. Por lo tanto, el desarrollo y despliegue de la energía nucleoelectrica podrían ser para algunas naciones una opción atractiva para contribuir a un suministro energético seguro y fiable a largo plazo.

En los últimos tres decenios, se han acumulado miles de años-reactor de experiencia operacional con los sistemas nucleares económicos y fiables actualmente existentes. Sobre la base de estos logros y de las enseñanzas extraídas de la experiencia de las centrales en explotación, se han desarrollado, o se están desarrollando, nuevas generaciones de centrales nucleares; por lo tanto, se prevé que los nuevos diseños avanzados serán aún más seguros, económicos y fiables que sus predecesores.

Los nuevos diseños de reactores nucleares de tamaño mediano y pequeño representan una opción no sólo para la producción de electricidad, sino como fuentes de calor para diversos usos. Se está investigando la factibilidad de usar un reactor nuclear de alta temperatura enfriado con gas (High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR), que genere electricidad y también aprovechando su calor se produzca hidrógeno [1,2,3]. Este hidrógeno podría alimentar Celdas de Combustible de Óxido Sólido (SOFC por sus siglas en inglés), que serían usadas en aplicaciones de alta potencia, incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala industrial.

Algunas organizaciones que desarrollan este tipo de celdas de combustible también prevén el uso de éstas en vehículos motores. Una prueba de 100kW está siendo terminada en Europa mientras que dos pequeñas unidades de 25kW se encuentran ya en línea en Japón. Un sistema de Óxido Sólido normalmente utiliza

un material duro cerámico en lugar de un electrolito líquido permitiendo que la temperatura de operación alcance los 1,800 F. Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar un 60%.

Algunos países han alcanzado un considerable grado de avance en el desarrollo de estas tecnologías. Además, lo atractiva que resulta su combinación por eficiente y por su bajo impacto ambiental, hace conveniente que se haga un estudio más profundo de la posibilidad de que en México sean consideradas seriamente como alternativa para satisfacer parte de la demanda eléctrica en los próximos años, aportando a la vez beneficios adicionales como son la disminución de la contaminación atmosférica y la producción de agua potable.

Las celdas de combustible generan electricidad en corriente continua que al pasar por un sistema inversor se pueda transformar en corriente alterna y poderla incluir en la red del sistema eléctrico nacional, ofreciendo como subproducto agua pura y calor; calor que puede crear corrientes de convección.

En la figura A se muestra a grandes rasgos el proceso para generar energía eléctrica, calor y agua pura, a partir de un proceso por el cual pasa el gas natural.

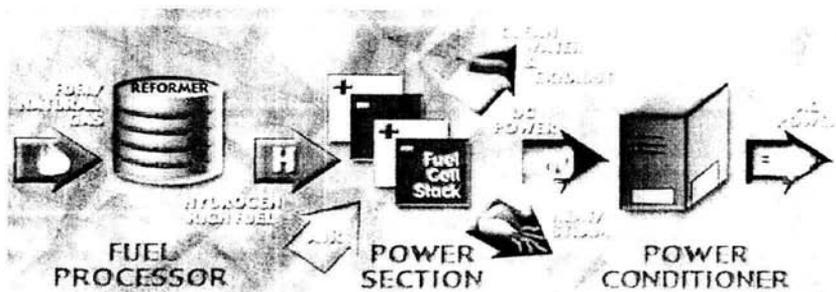


Figura A. Esquema de producción de energía eléctrica a partir del gas natural. [4]

Este es sólo un uso que se le puede dar al hidrógeno, ya que en el futuro se podría producir hidrógeno y llevarlo a las casas como se está haciendo con el gas natural, sólo que en vez de gas natural, estas tuberías llevarán hidrógeno que llegará hasta celdas de combustible que producirán energía eléctrica, agua y calor.

El hidrógeno también podría ser utilizado para mover a los automóviles, adaptando a una de estas celdas de combustible un motor eléctrico mucho más eficiente y limpio que el de combustión interna.

Hoy en día se están realizando a nivel mundial investigaciones para producir hidrógeno en gran escala a partir de reactores nucleares, como un sistema energético de bajo impacto ambiental y económicamente competitivo. Se están analizando diferentes tipos de reactores nucleares, así como varios procesos de producción de hidrógeno.

Actualmente el hidrógeno se utiliza principalmente en la industria química y se obtiene principalmente de los hidrocarburos. La figura B ilustra las fuentes de energía primaria a partir de las cuales se produce hidrógeno y la figura C muestra el uso actual que se le da a este combustible a nivel mundial

Producción de hidrógeno

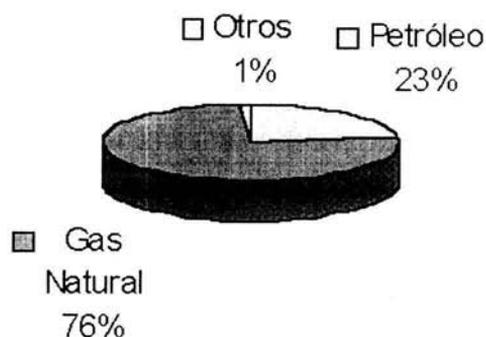


Figura B. Producción de hidrógeno a partir de diferentes fuentes de energía primaria; es decir de energía disponible en la naturaleza, pero en cantidades limitadas. [4]

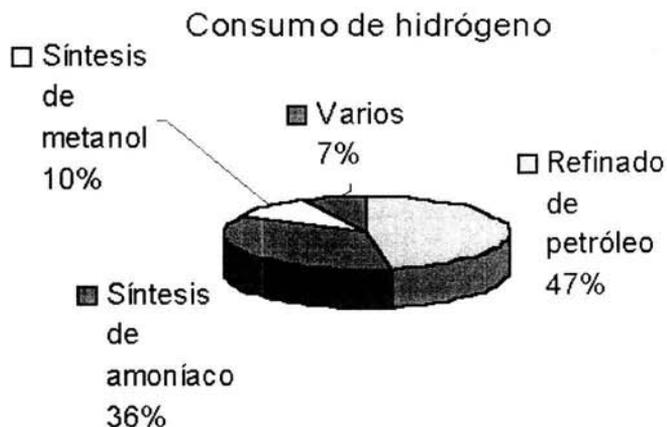


Figura C. Principales usos actuales del hidrógeno. [4]

Con base en lo planteado anteriormente, surgió la idea de desarrollar esta tesis, cuyo objetivo es estudiar la posibilidad de producir hidrógeno por medio de la energía nuclear, aprovechando el sitio de Laguna Verde y de la zona de producción de hidrocarburos en el estado de Veracruz.

A continuación se presenta una breve descripción del contenido de cada capítulo de la tesis:

En el capítulo 1 se analiza los diferentes métodos que se conocen y algunos que aún están en experimentación para poder obtener hidrógeno, algunos se explican con detalle, haciendo énfasis en aquellos que considero deben ser los más convenientes, al igual que se comparan las ventajas y desventajas de algunos.

El capítulo 2, muestra los diferentes tipos de reactores que existen, al igual que los que aún se encuentran en periodo de prueba y experimentación, así como algunas características de éstos, que ayudarán a elegir el reactor más adecuado para producir hidrógeno.

En base al capítulo 1 y 2 se toma la decisión de elegir un proceso para la producción de hidrógeno como lo es el proceso de reformado de metano con vapor y un ciclo termoquímico llamado ciclo SI, ambos procesos necesitan temperaturas cercanas a los 900 °C, es así como se elige el reactor adecuado para suministrar esta temperatura, en particular se mencionan dos reactores, el HTGR y el Reactor Modular de Cama de Esferas (Pebble Bed Modular Reactor, PBMR), ambos pertenecen al grupo de reactores de alta temperatura enfriados por gas.

El capítulo 3, se ocupa de la materia prima que utilizaría esta planta de producción de hidrógeno, en este caso se elige el proceso de reformado de metano con vapor, para el que la principal materia prima sea el metano. El proceso funciona para cualquier hidrocarburo, incluso con el carbón, sólo que es necesario una mayor energía térmica, además de que entre más grande sea la cadena de C-H, el proceso contaminará más. El mayor porcentaje de composición del gas natural es metano, es por eso que revisando en el anuario de PEMEX se toman algunos datos, como principales yacimientos, tuberías de gas natural, producción anual, producción de PEMEX de hidrógeno por año y precio del gas natural.

En el capítulo 4, se realiza un análisis del sitio de Laguna Verde y para ello se efectúa un balance de masa y energía para saber qué tanto hidrógeno se puede obtener con el reactor nuclear elegido y se estiman las cantidades que se necesitan de gas natural. En este mismo capítulo se realiza un balance de masas y energía por hora para poder producir la cantidad promedio que PEMEX ha producido desde 1992 hasta el 2001, lo cual es equivalente a 13 mil toneladas por cada año. Debido a que esta cantidad de hidrógeno será almacenada, se realiza un análisis para el caso en que la masa total se incendiara, es decir las 13 mil toneladas y los efectos que causarían en el sitio de Laguna Verde, dependiendo de la distancia y el flujo de radiación de calor; también se realiza el análisis para una masa de 5 mil toneladas y 2.5 mil toneladas.

En el capítulo 5 se presentan datos relacionados con el costo de producción del hidrógeno por el proceso de reformado de metano con vapor y el ciclo termoquímico SI.

Al final se presentan las conclusiones a las que se llegaron y trabajo futuro que se puede desarrollar.

CAPITULO 1. METODOS DE PRODUCCION DE HIDROGENO.

En este capítulo se describen los principales métodos de obtención de hidrógeno, así como algunas de sus características, con la finalidad de elegir el método más apropiado para generar hidrógeno utilizando la energía térmica de un reactor nuclear y poder compararlo con otro método.

1.1. Principales Fuentes de Hidrógeno.

Existen varios métodos para obtener el hidrógeno, en la figura 1.1 se ilustran las principales fuentes y métodos de producción de hidrógeno; en este capítulo se describen algunos de estos procesos.

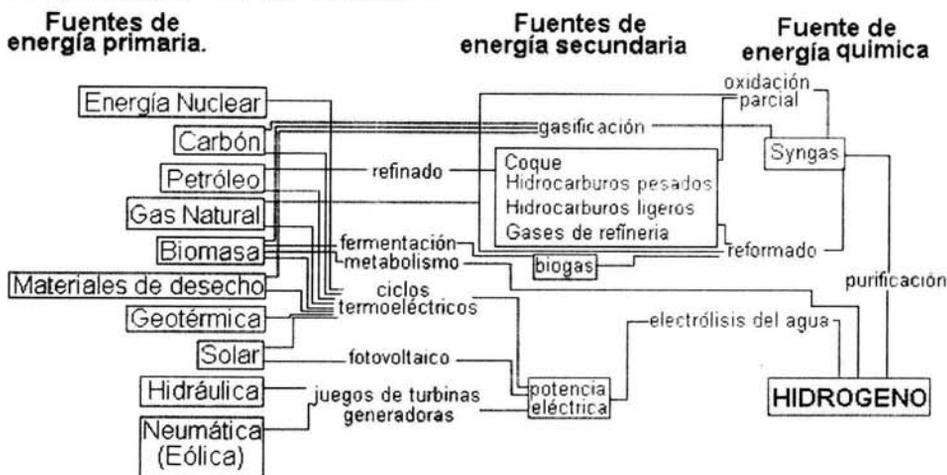


Figura 1.1 Fuentes y producción de Hidrógeno. [5]

El hidrógeno es un elemento esencial en la industria actual y su producción mundial se estima en unos 20 millones de toneladas anuales [4]. La mayoría del hidrógeno se obtiene a partir del reformado con vapor de hidrocarburos (gas natural o destilados ligeros). En lo que se refiere al consumo, los principales destinatarios están representados por las industrias petroquímicas y de refinado. En estas industrias, la planta de hidrógeno es una de las principales unidades, estrechamente integrada en el complejo industrial. Todas las plantas comparten una tecnología similar en la cual el reformador, compuesto por tubos rellenos de catalizador, constituye el elemento esencial.

Las plantas de gasificación de carbón son muy diferentes de los sistemas basados en el reformado con vapor. Esta diferencia no sólo se encuentra en el propio reactor de gasificación, sino también en el equipo auxiliar utilizado para la manipulación del carbón, la eliminación del azufre, el tratamiento del agua y la

separación del aire. La complejidad de la planta hace que únicamente las instalaciones de gran tamaño se encuentren justificadas económicamente.

La otra tecnología habitual para la producción de hidrógeno es la electrólisis del agua. Aunque el elevado consumo eléctrico hace que esta alternativa no sea muy atractiva para la mayoría de los usuarios industriales, algunas ventajas específicas de este proceso lo convierten en un buen candidato para su utilización en regiones aisladas donde el suministro eléctrico se encuentre disponible a bajos precios.

Los pequeños consumidores de hidrógeno utilizan convertidores de metanol y craqueadores de amoníaco para producir un gas rico en hidrógeno y que puede ser purificado posteriormente. Actualmente, estos sistemas no representan una alternativa significativa a los reformadores con vapor para la producción industrial de hidrógeno debido al alto costo de la alimentación. Sin embargo, es posible encontrar aplicaciones muy interesantes para este tipo de unidades en las celdas de combustible. La principal ventaja se encuentra en la relativa simplicidad del reactor químico que se traduce en una menor inversión.

El hidrógeno también puede ser recuperado de forma efectiva a partir de muchos gases industriales como los derivados de los hornos de carbón, de las plantas petroquímicas o de diferentes procesos electrolíticos. En algunos casos, la recuperación consiste únicamente en la eliminación de impurezas; en otros, se requiere la reacción con vapor de agua para eliminar el monóxido de carbono produciendo hidrógeno y dióxido de carbono.

La purificación del hidrógeno puede conseguirse, según las condiciones, por lavado de gases con soluciones adecuadas (absorción), por paso a través de membranas semi-permeables o tamices moleculares (adsorción), por destilación criogénica o por reacción del hidrógeno con compuestos metálicos especiales para formar hidruros. Gracias a la purificación, estas corrientes ricas en hidrógeno que son valoradas como combustible se convierten en productos con un precio mucho más elevado. [4]

La obtención de hidrógeno en experimentos de laboratorio se logra mediante reacciones químicas como las producidas al sumergir zinc en ácidos o bases fuertes. Esta técnica, sin embargo, no resulta práctica para las aplicaciones industriales debido a su alto costo económico.

La obtención del hidrógeno a partir de la energía convencional es ampliamente utilizada en la industria, pero es evidente el alto precio ecológico que ello trae consigo debido a la emisión intensiva de gases de la combustión que, además de ser nocivos para los seres vivos, influyen en el calentamiento global de la biosfera como consecuencia del efecto invernadero y lluvias ácidas.

A continuación se realizará una clasificación de los diferentes tipos de producción del hidrógeno.

1.2. Descomposición Electroquímica o Electrólisis.

La descomposición electroquímica del agua o electrólisis se usa extensivamente para la producción industrial de grandes volúmenes de hidrógeno; consiste en hacer reaccionar sus iones en electrodos polarizados, utilizando corriente continua, obteniéndose como resultado en la zona catódica hidrógeno molecular en estado gaseoso, y en la anódica oxígeno en iguales condiciones. El principal problema de la obtención de hidrógeno a partir de la descomposición electroquímica del agua es el alto costo energético, por lo que se precisa contar con fuentes primarias accesibles, de bajo costo y preferiblemente no fósil.

La forma de producir la energía eléctrica para poder realizar la electrólisis es la que origina una modificación en el nombre de la técnica de producción, así se tiene la fotoelectrólisis en la que se utilizan fotoceldas que absorben la radiación solar generando energía eléctrica y con ésta se realiza la electrólisis, también se pueden utilizar aerogeneradores, energía hidroeléctrica, geotérmica, combustión de biomasa, energía nuclear y cualquier otro proceso capaz de producir energía eléctrica para después realizar la electrólisis.

La electrólisis del agua empleando fuentes alternas de energía, como la solar y la eólica constituye una excelente alternativa para su producción en el futuro. Actualmente, si comparamos el costo del hidrógeno producido por electricidad convencional, de \$30 USD/MBTU, contra el producido por las actuales celdas solares comerciales que es de \$72 USD/MBTU, encontramos que existe una gran diferencia entre ellos. Cabe mencionar que la producción de hidrógeno por electricidad convencional no refleja el costo del daño ecológico que estas fuentes convencionales provocan. De cualquier manera, el costo de producir hidrógeno por medio de energía solar debe ser abatido empleando celdas solares que sean más eficientes y estables que las actuales. [6]

1.3. Descomposición Térmica Directa.

A temperatura de 2 500°C (4 500°F) el agua se descompone en H₂ y O₂. Para lograr tales temperaturas pueden utilizarse concentradores solares como fuente suministradora de calor. El problema aquí consiste en evitar la recombinación del hidrógeno y el oxígeno.

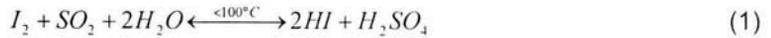
1.4. Ciclos Termoquímicos.

Una termólisis directa del agua requiere temperaturas mayores a los 2500°C, lo cual no es práctico bajo condiciones normales. El proceso se divide en diferentes reacciones parciales, cada una necesita un nivel bajo de temperatura, la temperatura requerida es de 800 a 900 °C.

Un ciclo termoquímico es un ciclo limitado de Carnot significando que esas temperaturas altas podrían mejorar la conversión eficiente.

De los procesos termoquímicos, el potencial más considerable lo tiene el proceso azufre - yodo (SI) el cual fue investigado primero en General Atomics, San Diego,

E.U.A., por muchos años, demostrando su viabilidad. El proceso SI consiste en los siguientes tres pasos:



La descomposición endotérmica de yoduro de hidrógeno produce hidrógeno y yodo, y la descomposición térmica del ácido sulfúrico produce oxígeno, dióxido de azufre y agua. El Yodo, el dióxido de azufre y el agua son regresados al ciclo junto con más agua, y los productos restantes son el hidrógeno y oxígeno. En la descomposición de H_2SO_4 y HI se encontró que este procedimiento causa problemas de corrosión severos. Según los estudios analíticos, puede esperarse una eficacia de 40 - 50% bajo condiciones de operación óptimas, General Atomics da una figura de mérito de 47%. El proceso de SI (Ver figura 1.2) fue diseñado para ser acoplado con un reactor de alta-temperatura o un reactor de fusión originalmente y más recientemente también con una planta termal solar. El ciclo se ha verificado a escala en el laboratorio en Japón y se piensa que después se podría conectar a un reactor de prueba de alta temperatura (HTTR por sus siglas en inglés) para demostración.

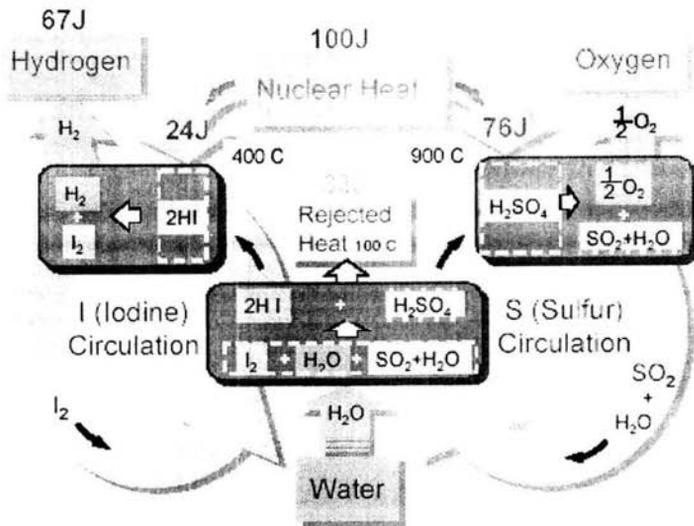


Figura 1.2. Proceso SI en el cual se obtienen hidrógeno y oxígeno. [7]

1.5 Biofotólisis.

Los microorganismos presentes en el agua la descomponen, al absorber la luz, liberando hidrógeno en el proceso de su "alimentación". El uso de procesos similares está presente en tecnologías tales como la síntesis de metanol, metano, etanol, etc. La realización de un proceso tecnológico práctico para la producción de hidrógeno a partir de luz, agua, dióxido de carbono y algas (producción fotobiológica), será la mayor fuente biológica de energía renovable y sustentable, sin emisiones de gases con efecto invernadero (aunque el vapor de agua es un gas con efecto invernadero) ni contaminación medioambiental.

El proceso producirá gas hidrógeno, más biomasa y agua de lavado como desechos. La biomasa puede ser tratada para producir compuestos de valor como, proteína de alto valor, biogas, biodiesel y pigmentos.

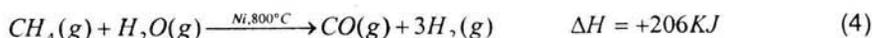
Para poder generar 1 GWh se necesitaría un área de fotobiorreactores de 6400 Hectáreas, o 64 Km², más las 20000 Hectáreas, (200 Km²) de área de lagunas. [8]

1.6. Reformado de Vapor con Metano.

Hay otras rutas sintéticas más adecuadas para la obtención del hidrógeno a escala industrial, una de ellas es el proceso catalítico de reformado del vapor de hidrocarburos, este proceso entra en el grupo de producción por ciclos termoquímicos. Es el método utilizado para producir la mayor parte del hidrógeno. El reformado con vapor de agua del gas natural representa alrededor de las tres cuartas partes de la producción total de hidrógeno. El proceso se basa en la reacción del vapor de agua y el metano a alta temperatura sobre un catalizador. Otros gases que contienen hidrocarburos también son adecuados para la producción de hidrógeno; tal es el caso de diferentes gases (biogases) procedentes de la fermentación anaerobia de biomasa y residuos.

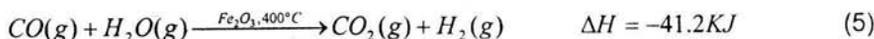
Este es un proceso que transcurre en varias etapas:

(1) Reacción endotérmica catalizada entre el metano (gas natural) con vapor de agua a alta temperatura produciendo una mezcla de CO e H₂ llamada syngas:

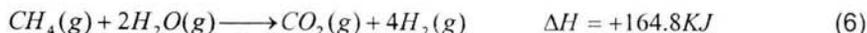


La mezcla gaseosa así obtenida es difícil de separar ya sea física o químicamente (es necesario enfriar hasta -205 °C antes de que el CO pueda condensar).

(2) Para aumentar el rendimiento y facilitar también la separación posterior, el CO se oxida a CO₂. Para ello, la mezcla es enfriada y se le inyecta vapor de agua de nuevo, esta vez sobre un catalizador de Fe₂O₃.



La reacción global es por tanto:



El problema de separar el dióxido de carbono de la molécula de hidrógeno es más sencillo. Hay varias formas de abordar la separación:

(1) Medios físicos. Una opción es enfriar la mezcla por debajo de la temperatura de condensación del CO_2 ($-78^\circ C$) muy diferente a la del H_2 ($-253^\circ C$).

(2) Medios químicos. El CO_2 es un óxido ácido que reacciona con una disolución de carbonato potásico para dar el carbonato ácido de potasio. Calentando éste se puede regenerar el carbonato:

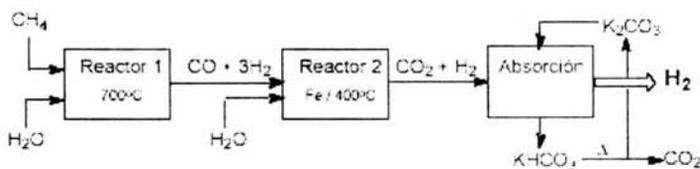
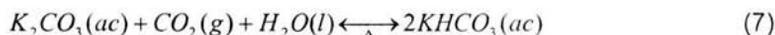
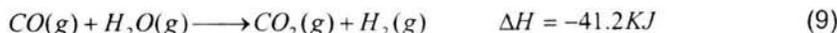
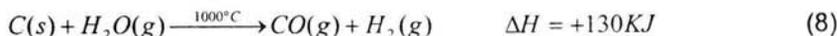


Figura 1.3. Esquema gráfico del proceso de reformado.

Una alternativa al metano es la utilización de cualquier otro hidrocarburo o incluso el carbón (más abundante) [9]:

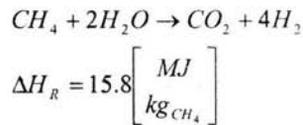


1.6.1. Balances de masa y energía para el proceso de reformado de metano con vapor

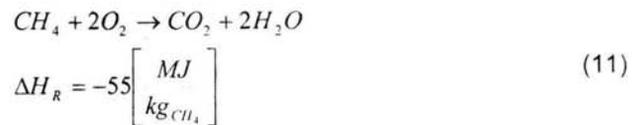
Consideremos un balance de masa y energía global de la planta de reformado de metano con vapor, en estado estacionario.

Reformado (molar)

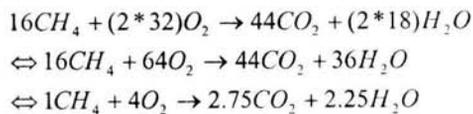
de (6)



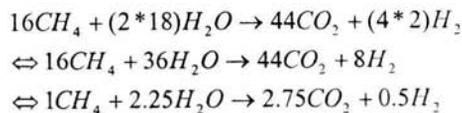
Combustión (molar)



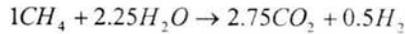
A partir de (11) se tiene la siguiente reacción balanceada en masa (kg)



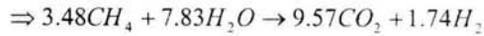
Por otro lado a partir de (6) se tiene la siguiente reacción en base másica (kg)



y dado que,

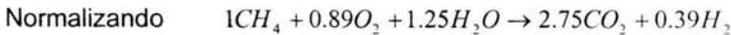
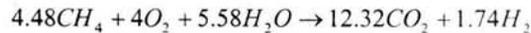
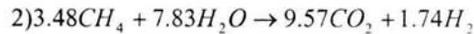
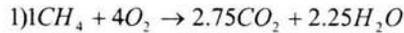


$$\Delta H_R = 15.8 \left[\frac{MJ}{kg_{CH_4}} \right]$$

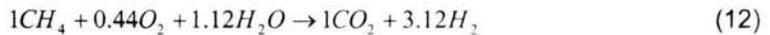


$$\text{requiere: } H_R = 15.8 \left[\frac{MJ}{kg_{CH_4}} \right]$$

Una vez realizado el balance de masa y de energía para la planta de reformado de metano con vapor, se tienen las siguientes reacciones en base másica (kg).



El que expresado en estequiometría molar corresponde a:



En resumen, tras realizar los balances de masa y energía en estado estacionario para el proceso de reformado de metano con vapor (MSR por sus siglas en inglés) se tiene:

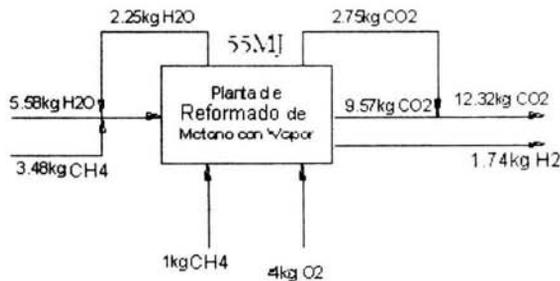
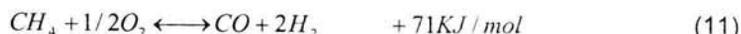


Figura 1.4. Esquema de una planta de reformado de metano con vapor, con balance de masa.

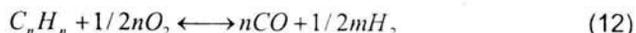
También se obtiene hidrógeno como subproducto en la fabricación de estireno, metanol y amoníaco.

1.7. Oxidación Parcial.

Este proceso es capaz de convertir metano y otros hidrocarburos más pesados que la nafta, catalizada o no catalizada, donde el proceso de reformado no es aplicable.



o para cualquier hidrocarburo en general:

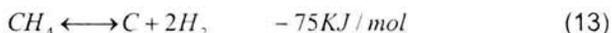


El proceso catalítico trabaja alrededor de los 600°C usando una alimentación de metano o nafta.

El proceso no-catalítico trabaja a una temperatura entre 1100 y 1500°C y una presión en el rango de 2 a 6 Mpa usando hidrocarburos del metano al aceite pesado y el carbón. El oxígeno puro se toma de un paso de descomposición aéreo debido a la dificultad para limpiar el hidrógeno del nitrógeno.

1.8. Ruptura Térmica.

Una alternativa para el reformado del metano es un simple paso de descomposición termocatalítico o "ruptura térmica". El metano y otros hidrocarburos se descomponen a temperaturas entre 700 y 980°C y, si no está presente el aire, forma hidrógeno y carbón:



Este proceso ha sido practicado desde hace muchos años en la producción de carbón negro para la vulcanización del neumático de caucho y para la industria de la imprenta. A pesar de la ventaja que ningún dióxido del carbono se forma, es considerado a menudo una reacción no deseada debido a la formación de carbono sólido. [5]

1.9. Comparación de los Métodos de Producción de Hidrógeno.

Si se comparan los procesos de producción de hidrógeno, se tiene que tomar en cuenta la interdependencia de la eficiencia, inversión y valor del subproducto. El proceso de reformado de metano con vapor es el más eficiente de los procesos ya que se tiene una eficiencia del 70 al 80% además de ser el más económico, es por eso que se usa como referencia, la desventaja es que en el proceso se genera dióxido de carbono que es contaminante. Se han dado soluciones para esta desventaja como el secuestro de carbono de la cual se habla en el capítulo 5. El proceso de reformado de vapor con metano es el más utilizado para producir hidrógeno a nivel mundial.

En la tabla 1 se comparan algunos procesos para producir hidrógeno, nótese que el proceso de reformado de metano con vapor es el más eficiente y el más barato.

Tabla 1. Características de algunos procesos de producción de hidrógeno.
[10]

Proceso	Energía Requerida en [Kwh/Nm ³ de H ₂]		Estado.	Eficiencia [%]	Costo relativo al proceso de reformado de vapor con metano ⁽¹⁾	Fracción de Producción [%] ⁽²⁾
	en teoría	en práctica				
Reformado de metano con vapor	0.78	2 - 2.5	Maduro	70 - 80	1	48
Oxidación parcial de aceite pesado	0.94	4.9	Maduro	70	1.8 (1.6)	30
Gasificación de carbón. (TEXACO)	1.01	8.6	Maduro	60	1.4 - 2.6 (2.3)	18
Electrólisis del agua.	3.54	4.9	Maduro	27 ⁽³⁾	5 - 10 (3)	4
Electrólisis a altas temperaturas			Desarrollo	48	(2.2)	
Ciclos Termoquímicos			Investigación diseño	35 - 45	6	
Conversión de Biomasa			Investigación diseño		2 - 2.4	
Fotólisis			Investigación diseño		< 10	-----

(1) Estimado por DOE, 1993, en paréntesis estimación por Steinberg, 1987

(2) Datos de 1988

(3) Electricidad de fósiles con 40% de eficiencia.

CAPITULO 2.

REVISION Y SELECCION DE LOS TIPOS DE REACTORES NUCLEARES PARA LA PRODUCCION DE HIDROGENO.

En este capítulo se presentarán algunos de los reactores nucleares que fueron usados o están en uso, así como nuevos diseños, con la finalidad de seleccionar el reactor adecuado para producir hidrógeno.

Un reactor produce y controla la liberación de energía de la fisión de los átomos de ciertos elementos. En un reactor nuclear, la energía liberada es usada como calor para producir vapor y generar electricidad por medio de turbinas acopladas a un generador eléctrico. En un reactor de investigación el propósito principal es usar los neutrones producidos en el núcleo para experimentación, producción de radioisótopos, etc. En casi todos los reactores navales el vapor mueve una turbina para producir una propulsión directa.

Los principios básicos que hacen que los reactores nucleares produzcan electricidad son los mismos para casi todos los tipos de reactores. La energía liberada por la fisión de los átomos del combustible es capturada como calor, ya sea en un gas o en agua (ligera o pesada) y es usado para producir vapor. El vapor es usado para propulsar las turbinas que generan electricidad (como en la mayoría de las plantas de combustibles fósiles).

Hay varios componentes comunes a la mayoría de los reactores:

Combustible. Normalmente "pellets" o pastillas de óxido de uranio (UO_2) ordenadas dentro de tubos que forman las barras de combustible. Las barras son dispuestas en ensambles de combustibles en el núcleo del reactor.

Moderador. Este es un material que disminuye la velocidad de los neutrones liberados por la fisión de manera que pueden causar más fisión. Puede ser agua, agua pesada, o grafito.

Barras de Control. Son fabricadas con materiales que absorben neutrones como el cadmio, hafnio, o boro, y son insertadas o retiradas del núcleo para controlar la tasa de reacción, o para detenerla.

Refrigerante. Es un líquido o un gas que circula a través del núcleo de manera que transfiere el calor generado en el mismo.

Vasijas o Tubos de Presión. Es un contenedor de acero muy robusto, que contiene al núcleo del reactor o a veces son una serie de tubos que contienen al combustible y que transportan al refrigerante (reactor CANDU).

Generador de Vapor. Parte del sistema de enfriamiento donde el calor del reactor es usado para producir vapor para la turbina.

Edificio Contenedor. La estructura alrededor del núcleo del reactor que está diseñado para protegerlo de intrusiones del exterior, y para proteger a quienes están afuera de los efectos de la radiación o cualquier desperfecto en su interior. De manera típica se trata de una estructura de concreto y acero de un metro de espesor.

Existen diferentes tipos de reactores como se indica en la tabla a continuación:

Tabla 2. Diferentes tipos de reactores. [11]

Tipo de Reactor	Principales Países	Cantidad	GWe	Combustible	Refrigerante	Moderador
Reactor de Agua Presurizada (PWR)	US, Francia, Japón, Rusia	252	235	UO ₂ enriquecido	agua	agua
Reactor de Agua Hirviente (BWR)	US, Japón, Suecia	93	83	UO ₂ enriquecido	agua	agua
Reactor Enfriado a Gas (Magnox & AGR)	Gran Bretaña	34	13	U natural (metal), UO ₂ enriquecido	CO ₂	grafito
Reactor Agua Pesada Presurizada "CANDU" (PHWR)	Canada Argentina	34	18	UO ₂ natural	agua pesada	agua pesada
Reactor de Agua y Grafito (RBMK)	Rusia	14	14	UO ₂ enriquecido	agua	grafito
Reactor de Neutrones Rápidos (FBR)	Japón, Francia, Rusia	4	1.3	PuO ₂ y UO ₂	sodio líquido	ninguno
otro	Rusia, Japón	5	0.2			
	TOTAL	436	364.5			

GWe = capacidad en miles de megawatts eléctricos.

La mayoría de los reactores necesitan ser apagados para reaprovisionarlos de combustible, para lo cual la vasija de presión debe ser abierta. En este caso el recambio de combustible se efectúa cada 1 o 2 años, momento en que de un cuarto a un tercio de los ensambles de combustible gastado son reemplazados por ensambles nuevos. Los tipos CANDU y RBMK tienen tubos de presión (en

lugar de una vasija de presión que contiene al núcleo del reactor) y pueden ser reabastecidos en operación a través tubos de presión individualmente.

Si el moderador usado es agua pesada o grafito, es posible hacer funcionar un reactor con uranio natural en lugar de uranio enriquecido. El uranio natural tiene la misma composición elemental que cuando fue extraído de las minas (0.7% de U-235 y más del 99.2% de U-238). El uranio enriquecido tiene su proporción de isótopo fisionable (U-235) incrementada de 3.5 – 5.0% por un proceso llamado "enriquecimiento". En este caso el moderador puede ser agua común, y esos reactores son colectivamente llamados "reactores de agua ligera". Como el agua ligera absorbe neutrones de la misma manera que los frena, es menos eficiente como moderador que el agua pesada o el grafito.

Prácticamente todo combustible es un óxido de uranio cerámico (UO_2 con un punto de fusión de $2800^{\circ}C$ y la mayoría es enriquecido). Las pastillas de combustible (usualmente 1 cm de diámetro por 1.5 cm de largo) están típicamente dispuestas dentro de un largo tubo de aleación de zirconio (zircaloy) para formar una barra de combustible, siendo el zirconio duro, resistente a la corrosión y permeable a los neutrones*. Numerosas barras forman un ensamble de combustible, que es un entramado abierto que puede ser izado o descendido al interior del núcleo del reactor. En los reactores más comunes estas barras tienen unos 3.5 metros de largo.

A menudo se usan venenos quemables (especialmente en los tipos BWR) en el combustible para poder operar el reactor durante el tiempo que va de la carga de combustible fresco al reabastecimiento. Se trata de absorbentes de neutrones que reducen la reactividad al inicio del ciclo de operación y que se van consumiendo bajo la exposición a los mismos neutrones. De esta manera se va compensando la disminución de material fisil a medida que el combustible se va utilizando. El más conocido es el **gadolinio**, que es un ingrediente vital del combustible de los reactores de la marina donde la carga de combustible nuevo debe ser tal que los reactores son diseñados para funcionar más de diez años entre reabastecimientos.

2.1. Reactor de Agua Presurizada (PWR)

Este es el tipo más común, con más de 230 reactores para generación eléctrica y un centenar más en usos para propulsión de navíos de la marina. El diseño original surgió como una planta nuclear para submarinos; usa agua común tanto como refrigerante como moderador. El diseño se distingue por tener un circuito primario de refrigeración que fluye a través del núcleo bajo grandes presiones, y

* El Zirconio (Zr) es un material importante para la energía nuclear, donde encuentra su principal uso. El Zr muy puro, "grado nuclear" se utiliza para fabricar el Zircaloy, que es 98% Zr más estaño, hierro, cromo y, algunas veces níquel para aumentar su resistencia.

un circuito de refrigeración secundario en donde se genera el vapor para mover las turbinas de propulsión.

Un reactor PWR tiene ensamblajes de combustible de 200 a 300 barras cada uno, dispuestos verticalmente en el núcleo, y un reactor grande tendrá unos 150 a 250 ensamblajes con 80 a 100 toneladas de uranio.

El agua dentro del núcleo alcanza unos 325°C , por ello debe ser mantenida bajo presiones de unas 150 atmósferas para impedir que hierva. La presión se mantiene por medio de vapor en un presurizador (ver diagrama). En el circuito primario de refrigeración el agua también es el moderador, y si algo de ella se volviera vapor, la reacción de fisión en cadena dentro del núcleo disminuiría. Este efecto de realimentación negativa es una de las características de seguridad del sistema. Existe también un sistema secundario de apagado que incluye el agregado de boro al circuito primario. Vasija de acero presurizada

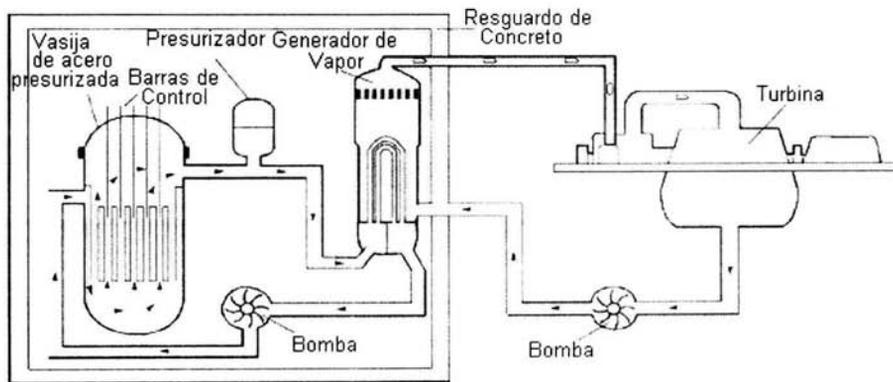


Figura 2.1. Diagrama del reactor de agua presurizada (PWR) [11]

2.2. Reactor de Agua Hirviente (BWR)

Este diseño (ver figura 2.2) tiene muchas similitudes con el PWR, excepto que existe un único circuito donde el agua está a una presión menor (unas 75 atmósferas) de modo que hierva dentro del núcleo a 285°C . El reactor ha sido diseñado para operar con el 12 al 15% del agua en la parte superior del núcleo en forma de vapor, teniendo así menos efecto moderador.

El vapor pasa a través de placas de secado (separadores de vapor) encima del núcleo y de allí directamente a las turbinas, que son así parte integrante del circuito del reactor. Dado que el agua alrededor del núcleo está siempre contaminada con trazas de radionuclidos, ello significa que la turbina debe ser aislada y se debe proveer protección radiológica durante el mantenimiento. El costo de esto tiende a balancear los ahorros debido a un diseño más simple. La

mayor parte de la radioactividad en el agua tiene una vida media muy corta*, de manera que el ingreso a la sala de turbinas puede hacerse muy poco tiempo después de que el reactor se ha detenido.

El ensamble de combustible de los BWR comprende 90 a 100 barras de combustible, y existen hasta 750 ensambles en el núcleo del reactor, con unas 140 toneladas de uranio.

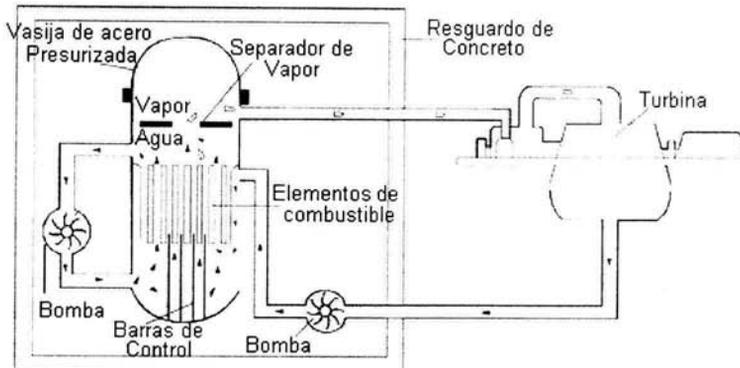


Figura 2.2. Reactor de agua hirviente (BWR) [11]

2.3. Reactor de Agua Pesada Presurizada (PHWR o CANDU)

El diseño del reactor CANDU fue desarrollado desde los años 50 en Canadá. Usa óxido de uranio natural (0.7% U-235) como combustible, por lo que necesita de un moderador más eficiente, en este caso el **agua pesada**. (D₂O).**

El moderador está en un gran tanque llamado **Calandria**, atravesado por cientos de tubos de presión horizontales que forman canales para el combustible, enfriado por un flujo de agua pesada bajo grandes presiones dentro del circuito primario de refrigeración, alcanzando 290°C. Como en los PWR, el refrigerante primario genera vapor en un circuito secundario para mover a las turbinas. El diseño del tubo de presión significa que el reactor puede ser reabastecido progresivamente sin tener que apagarlo, aislando los tubos de presión individuales del circuito de refrigeración.

* En su mayor parte N-16, con una vida media de 7 segundos.

** Con el sistema CANDU, el moderador es enriquecido (por ej.: agua) en lugar del combustible, es decir, no se gasta en enriquecer el combustible pero sí se gasta en enriquecer el moderador.

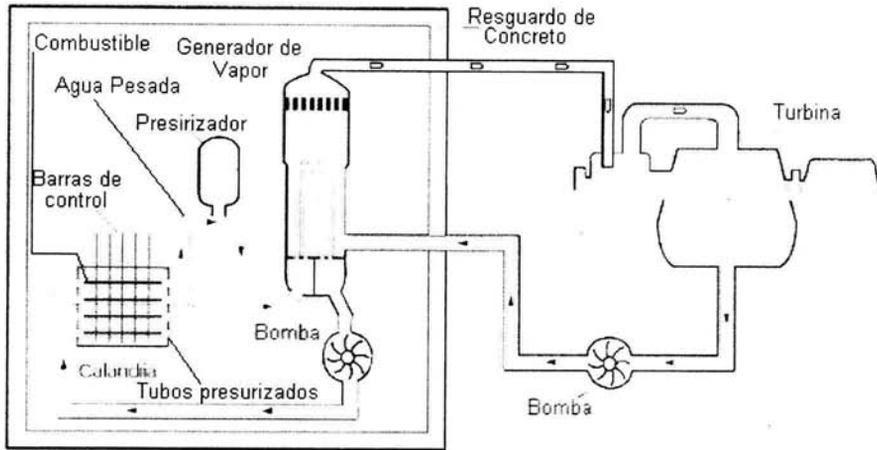


Figura 2.3. Reactor de Agua Pesada Presurizada (PHWR o CANDU) [11]

En los tubos de presión del CANDU circulan 37 ensamblajes de 0.5 metros de largo, constituidos por pastillas de uranio cerámico en tubos de zircaloy. Las barras de control penetran en la Calandria verticalmente, y también tiene un sistema secundario de apagado que incluye el agregado de boro al moderador. El moderador de agua pesada que circula a través del cuerpo de la Calandria también extrae un poco de calor (aunque este circuito no se muestra en la figura 2.3).

2.4. Reactor Avanzado Enfriado por Gas (AGR)

Éstos son los reactores Británicos de Segunda Generación enfriados por gas, que usan un moderador de grafito y dióxido de carbono como refrigerante. El combustible son pastillas de óxido de uranio, enriquecidos al 2.5 –3.5%, en tubos de acero inoxidable. El dióxido de carbono circula a través del núcleo alcanzando 650°C y luego a través de los tubos de generadores de vapor fuera de él, pero aún dentro de la vasija de presión de concreto y acero. Las barras de control penetran en el moderador y un sistema de apagado secundario incluye la inyección de nitrógeno al refrigerante.

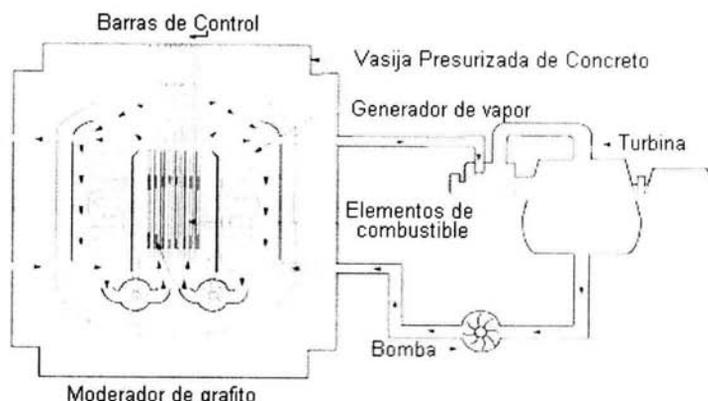


Figura 2.4. Reactor Avanzado Enfriado por Gas (AGR) [11]

El AGR fue desarrollado a partir del reactor **Magnox**, también moderado con grafito y enfriado con CO_2 , y una cantidad de éstos todavía están operando en la Gran Bretaña.

2.5. Reactor de Agua Ligera, moderado con Grafito (RBMK).

Este es un diseño Soviético, desarrollado a partir de los reactores de producción de plutonio. Emplea largos tubos de presión verticales (7 metros) que pasan a través del moderador de grafito (ver figura 2.5), y es enfriado por agua, a la que se le permite hervir dentro del núcleo a 290°C , como en los BWR. El combustible es óxido de uranio de bajo enriquecimiento dispuesto en ensambles de 3.5 metros de largo. La moderación es debida en gran parte al grafito fijo; el agua en ebullición simplemente proporciona el enfriamiento y contribuye a la absorción de neutrones. Este diseño presenta el problema de realimentación positiva. Se dice que un reactor tiene un coeficiente de reactividad por vacíos positivo, si al aumentar la fracción de vapor se incrementa la potencia, y por el contrario si es un coeficiente de vacíos negativo, entonces un aumento de la fracción de vapor produce un decremento de la potencia.

Cuando el coeficiente de vacíos es muy positivo, la potencia se puede incrementar muy rápidamente, porque cualquier incremento de potencia incrementa la generación de vapor, la cual incrementa de nuevo la potencia. Entonces este proceso de realimentación positiva es muy difícil de controlar.

Cuando el coeficiente es negativo, un exceso en la generación de vapor tenderá a apagar el reactor. Esto es una medida de seguridad inherente.

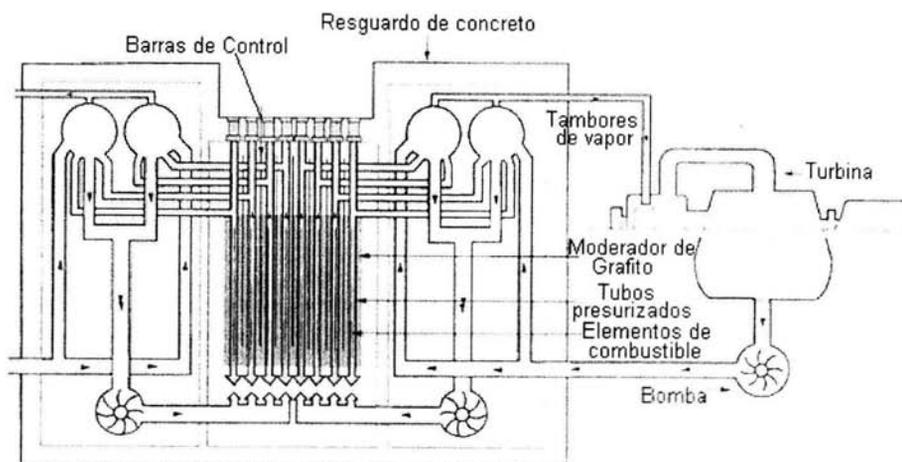


Figura 2.5. Reactor de Agua Ligera, moderado con Grafito (RBMK). [11]

En la tabla 3 se muestran los diferentes tipos de reactores antes mencionados y las temperaturas que alcanzan. Debido a que la temperatura de estos reactores no es suficiente para romper el enlace covalente de la cadena C_nH_m de los hidrocarburos, se investigó sobre la existencia de nuevos diseños de reactores.

Tabla 3. Temperaturas alcanzadas de algunos reactores.

TIPO DE REACTOR.	TEMPERATURA ALCANZADA [°C]
Reactor de agua presurizada PWR	325
Reactor de agua en ebullición BWR	285
Reactor de agua pesada presurizada PHWR ó CANDU	290
Reactor Avanzado enfriado por Gas AGR	650
Reactor de Agua Ligera moderado con Grafito RBMK	290

2.6. Reactores Avanzados

Actualmente se distinguen varias generaciones de reactores. Los reactores de la **Primera Generación** como Shippingport, Dresden, Fermi I y Magnox; fueron desarrollados entre 1950 y 1960 y pocos de ellos están aún en funcionamiento. Los reactores PWR, BWR, CANDU, VVER y RBMK pertenecen a los reactores llamados de **Segunda Generación**, y son los que se encuentran actualmente en

operación en todo el mundo. Los de **Tercera Generación** son los Reactores Avanzados como el ABWR, System 80+, AP600 y EPR; los primeros reactores de esta generación se encuentran operando en Japón desde 1996 (ABWR) y otros están en construcción o listos para ser ordenados. La **Cuarta Generación** de reactores está todavía en diseño y no serán operativos antes del año 2025.

Más de una docena de diseños de reactores avanzados (Generación III+) están en diferentes etapas de desarrollo. Algunos son evoluciones de los diseños PWR, los BWR y CANDU mostrados más arriba. Otros son diseños más avanzados. El diseño radical más conocido es el "Reactor Modular de Cama de Esferas" (Pebble Bed Modular Reactor), que usa helio como refrigerante a muy alta temperatura, para impulsar directamente a las turbinas.

Los diseños avanzados incorporan generalmente mejoras de los conceptos relacionados con la seguridad, incluidas, entre otras cosas, características que permitirán a los operadores disponer de más tiempo para tomar medidas de seguridad, y que proporcionarán una protección aún mayor contra cualquier liberación posible de radiactividad al medio ambiente. Los diseños mejorados también pueden incluir la introducción de características de seguridad pasiva basadas en fuerzas naturales tales como la convección y la gravedad, lo que permite reducir la dependencia de las funciones de seguridad de los sistemas y componentes activos, tales como las bombas y válvulas.

Se presta gran atención a la simplificación de las actividades de explotación, inspección, mantenimiento y reparación de las nuevas centrales, a fin de aumentar su rendimiento general desde el punto de vista de los costos. En caso de perturbaciones y accidentes, los sistemas de control, vigilancia y protección, ampliamente digitalizados, pondrán automáticamente a la central a funcionar de nuevo en condiciones normales o en un estado de apagado seguro, sin la intervención del operador. Los objetivos característicos de los diseños avanzados permiten a los operadores disponer de por lo menos 30 minutos para tomar medidas de seguridad y contar así con el tiempo necesario para evaluar la situación minuciosamente antes de intervenir. La mayor inercia térmica en el sistema del reactor y las menores densidades de potencia en el núcleo son dos factores importantes relacionados con el diseño.

En lo que respecta a los dispositivos de seguridad pasiva, sus funciones también serán normalmente independientes del suministro de corriente eléctrica (al menos después de la iniciación de la función), aprovechando mecanismos termohidráulicos tales como las diferencias de densidad, debidas a diferentes temperaturas, y tanques de agua elevados, a fin de, por ejemplo, permitir el flujo del refrigerante al sistema del reactor por gravedad para alcanzar los niveles máximos de refrigerante.

2.7. Diseños Avanzados [12]

Una forma de atender a las necesidades energéticas futuras es aumentar gradualmente la participación de la energía nuclear, introduciendo diseños avanzados en los sistemas de suministro de energía del mundo entero. En este contexto, cabe señalar que por diseño avanzado se entiende el diseño de una central de interés o mérito actual, pero que todavía no ha sido construida ni explotada; dichos diseños avanzados pueden, a su vez, dividirse en diseños evolutivos y en desarrollo. Un diseño evolutivo es un descendiente del diseño de una central existente que presenta las mejoras y modificaciones del diseño efectuadas en base al aprovechamiento de la experiencia e incluye nuevos adelantos tecnológicos; el diseño evolutivo de una central requiere a lo sumo ensayos técnicos y confirmatorios previos al desarrollo comercial. Por otra parte, el diseño en desarrollo incluirá diferencias más significativas con respecto a los diseños de centrales existentes, y puede requerir igualmente la construcción de una planta de demostración y/o planta prototipo antes del despliegue comercial en gran escala. Un diseño en desarrollo que incluye cambios radicales en el diseño puede denominarse diseño innovador, y representa, por lo tanto, una subcategoría especial de diseños de desarrollo, como los llamados reactores de la generación IV.

Actualmente se desarrollan tres tipos básicos de diseños avanzados:

- reactores refrigerados por agua;
- reactores rápidos; y
- reactores refrigerados por gas,

que se examinan a continuación.

2.8. Reactores Refrigerados por Agua

Los reactores refrigerados por agua se caracterizan por utilizar agua como moderador y refrigerante; los reactores de agua ligera (LWR) utilizan agua ligera normal (H_2O) y los reactores de agua pesada (HWR) utilizan agua pesada (D_2O), al menos como moderador.

Actualmente se encuentran en funcionamiento en todo el mundo unas 330 centrales LWR, lo que representa un 75% de todas las centrales nucleares en explotación. Este tipo de reactor se ha venido explotando desde hace más de 35 años. El continuo perfeccionamiento y mejoramiento evolutivo de los diseños de centrales LWR han constituido la base para el desarrollo de diseños de LWR

avanzados (ALWR), tanto del tipo BWR (reactor de agua en ebullición) como del tipo PWR (reactor de agua a presión).

Ejemplos de diseños de LWR avanzados

Unidades de gran tamaño:

ABWR	Construido por General Electric Co (GE), EE.UU., junto con Hitachi & Toshiba, y operando en Japón.
APWR	Diseñado por Westinghouse (W), EE.UU., junto con Mitsubishi, Japón
BWR 90	Diseñado por ABB-Westinghouse.
EPR	Diseñado por Nuclear Power International (NPI), una empresa conjunta de Framatome, Francia, y Siemens, Alemania (actualmente ANP-Framatome)
System 80 +	Diseñado por Combustion Engineering-Westinghouse.
WWER-1000 (W-392)	Diseñado por Atomenergoproject y Hidro press, Rusia

Unidades de mediano tamaño:

AP-600	PWR con mayores características de seguridad pasiva – diseñado por Westinghouse, EE.UU.
AC-600	PWR con mayores características de seguridad pasiva - diseñado por China National Nuclear Corporation
SBWR	BWR con mayores características de seguridad pasiva - diseñado por Mitsubishi, Japón
IRIS	Innovador, tipo de desarrollo PWR - diseñado por Westinghouse y un consorcio internacional.
SPWR	innovador, tipo de desarrollo PWR - diseñado por JAERI e IHI, Japón
WPBER-600	innovador, tipo de desarrollo PWR - diseñado por OKMB, Rusia

Actualmente se desarrollan reactores grandes y medianos; los primeros representarían, en gran medida, ampliaciones de los diseños existentes, mientras que en los más pequeños se emplearían mayormente dispositivos de seguridad pasiva con miras a la simplificación de las centrales y la realización de economías, a fin de lograr que, no obstante su menor tamaño, sean competitivas desde el punto de vista del costo. Algunos diseños de desarrollo, particularmente los diseños innovadores, incluyen funciones de seguridad de naturaleza distinta a las características de seguridad tradicionales de los diseños existentes, por ejemplo, funciones de autoprotección para la parada del reactor en caso de condiciones operacionales inaceptables y para la eliminación fiable del calor de decaimiento (el calor que se produce en el combustible después de la parada) del núcleo del reactor.

En el transcurso de los años se han realizado constantes mejoras del combustible en las centrales en funcionamiento; por ejemplo, el mayor empleo de absorbentes consumibles en el combustible y el mayor grado de quemado del combustible han permitido lograr reducciones considerables en el consumo de uranio, de un 20% en comparación con el estudio de 1978-1979 realizado por la INFCE (Evaluación Internacional del Ciclo del Combustible Nuclear). [12]

El reciclado de plutonio mediante combustible de mezcla de óxidos (MOX) se ha convertido en una práctica común en varios países, tales como Alemania, Francia, Japón y Suiza, y puede que otros países adopten también esta práctica en un futuro.

Los diseños avanzados procurarán normalmente aprovechar todos los progresos en el ciclo del combustible; los diseños del núcleo se optimizarán teniendo en cuenta las estrategias avanzadas en materia de absorbentes consumibles y los mayores grados de quemado del combustible. Muchos de ellos tendrán la capacidad de funcionar con un núcleo que contenga hasta un 100% de combustible MOX.

Las centrales de agua pesada HWR representan un 7% de todas las centrales nucleares en explotación; la mayoría de ellas son tipo CANDU, el diseño canadiense de reactor de tubos de presión. La mayoría de estas centrales han funcionado de manera segura, fiable y competitiva desde su primera puesta en marcha.

Las mejoras de diseño efectuadas en los reactores tipo CANDU se centran en el aumento de la seguridad de la central, la prolongación de su vida útil hasta 60 años, la simplificación de las actividades de sustitución de todos los componentes que no puedan diseñarse para una vida útil de esa duración, la reducción del plazo de construcción y la producción de electricidad a costos que sean competitivos con los de otras fuentes de energía (por ejemplo, el carbón bituminoso).

2.9. Reactores Rápidos

Los reactores rápidos utilizan neutrones de alta energía en el proceso de fisión, contrariamente a los reactores refrigerados por agua, los cuales utilizan neutrones térmicos. Los reactores rápidos se conocen también generalmente como reproductores, ya que producen combustible, además de consumirlo. La reproducción de plutonio permite a los reactores rápidos extraer 60 veces más energía del uranio que los reactores térmicos por lo que podrían resultar económicos y ventajosos para los países que no disponen de abundantes recursos de uranio. El mayor desarrollo de la energía nucleoelectrónica en los decenios venideros conducirá probablemente a un agotamiento de los recursos de uranio, y puede que en la primera mitad de este siglo sea necesario recurrir a los reactores reproductores para producir material fisionable.

En el espectro de neutrones rápidos presentes en tales reacciones, todos los elementos transuránicos se vuelven fisionables, por lo que los reactores rápidos podrían contribuir igualmente al quemado del plutonio procedente de la explotación de otros tipos de reactores y del desmantelamiento de las armas nucleares, así como a la disminución del inventario total de transuránicos dentro del reactor, transmutándolos en energía y productos de fisión. El reprocesamiento y el reciclado del combustible en los reactores rápidos permitirían el quemado de los radisótopos transuránicos de período muy largo, reduciendo considerablemente el tiempo de aislamiento requerido en el caso de los desechos de actividad alta.

Los reactores rápidos están refrigerados normalmente por metal líquido (sodio), por lo que se denominan reactores rápidos refrigerados por metal líquido (LMFR por sus siglas en inglés). Se han diseñado, construido y explotado centrales LMFR, tales como el BN-600 en Rusia, el Phénix y el Superphénix en Francia, y el Monju de 280 MWe en el Japón.

Los nuevos trabajos de desarrollo de los reactores rápidos se centran en los requisitos económicos y de seguridad revisados para la próxima generación de centrales nucleares. Prosiguen igualmente los trabajos encaminados a mejorar el grado de quemado y la tecnología de reciclado del combustible, a fin de reducir las cantidades de desechos radiactivos producidos en las centrales.

Actualmente se encuentran en estudio varios tipos distintos de LMFR, así como el empleo más amplio de sistemas pasivos para lograr una mayor seguridad; entre éstos se encuentran el BN-800M de Rusia, el DFBR del Japón, y el PFBR de la India. También existe un diseño de LMFR avanzado de pequeña y mediana potencia, desarrollado por la General Electric de los Estados Unidos de América. Este concepto de ALMFR incorpora dispositivos de seguridad pasiva, e incluye instalaciones de gestión y reelaboración de desechos, así como la fabricación de combustible en el emplazamiento de la central, formando un sólo parque nuclear a fin de minimizar los riesgos de proliferación de materiales fisionables. Entre otros reactores rápidos avanzados figura el reactor rápido europeo (EFR), que podría

llegar a ser ampliamente utilizado para el reciclado de plutonio y la producción de electricidad.

2.10. Reactores Refrigerados por Gas

Los reactores de alta temperatura refrigerados por gas (HTGR) se vienen desarrollando desde hace mucho tiempo, y aunque ya se han construido varias centrales prototipo o de demostración, no se ha logrado tener pleno éxito en su explotación. El HTGR es básicamente un reactor moderado por grafito con un gas (helio) como refrigerante. El gas He inerte y el diseño especial del combustible hacen posible su funcionamiento a temperaturas considerablemente superiores a las de los reactores refrigerados por agua, lo que permite, a su vez, producir a una temperatura (y presión) mucho más alta que la del vapor destinado a los generadores convencionales accionados por turbina de vapor, lográndose así una mejora considerable de la eficiencia térmica de la central, o producir calor industrial en régimen de alta temperatura para aplicaciones especiales (ver figura 2.6).

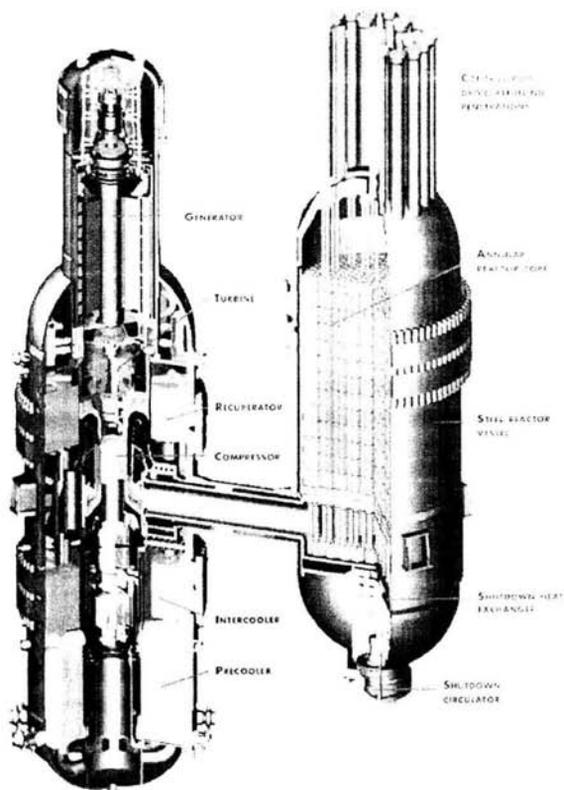


Figura 2.6. HTGR acoplado a un turbogenerador. [13]

En los últimos años, los trabajos de desarrollo del HTGR se han centrado en unidades modulares pequeñas, ya que los experimentos y análisis han demostrado que dichas unidades pueden lograr un grado excepcional de seguridad.

A diferencia del combustible LWR y LMFBR, el combustible HTGR no está contenido en agujas de combustible revestidas de metal, sino en partículas de combustible. Estas partículas miden entre 0.2 y 0.6 mm y consisten en una mezcla de óxido o carburo de uranio o torio o uranio/torio. A fin de retener los productos de fisión, cada partícula está revestida con varias capas de material cerámico resistente a altas temperaturas. Las partículas se dispersan de manera homogénea en una matriz de grafito que se comprime ulteriormente en elementos esféricos, bolas, o en forma de barras, que se introducen en los canales de combustible de un bloque de grafito de agujeros múltiples (ver figura 2.7). Las partículas permanecen intactas y retienen prácticamente todos los productos de fisión hasta una temperatura de unos 1600 C. Estas partículas no se funden a una temperatura umbral dada y sólo fallan gradualmente en condiciones de accidente; por lo tanto, no se puede producir una liberación súbita de los productos de fisión.

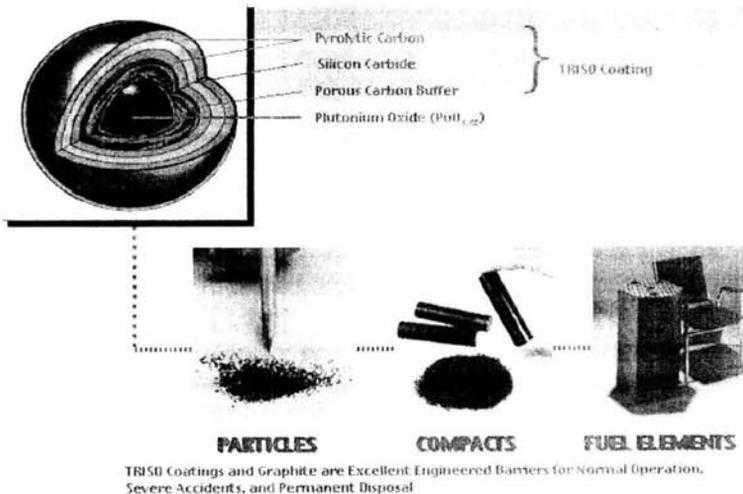


Figura 2.7. Combustible del HTGR. [13]

Los futuros trabajos de desarrollo de los HTGR se centrarán en los estudios para mejorar el comportamiento y prolongar la vida útil de las centrales. Con respecto a lo primero, actualmente se realizan considerables esfuerzos en relación con el denominado ciclo de turbina de gas, en el que el gas en régimen de alta temperatura pasa directamente a una turbina de gas, lo que permite obtener una eficiencia térmica muy elevada y prever costos energéticos reducidos, así como en lo que atañe a la producción de calor industrial en régimen de muy alta temperatura.

2.11. Reactor Modular Cama de Esferas (PBMR) [14]

En la década de los 50's, el Dr. Rudolf Schulten (después conocido como, "padre" del reactor *Pebble Bed*) tuvo la idea de compactar los gránulos de uranio revestidos con una capa de carburo de silicio, como una bola dura de billar (ver figura 2.8), las esferas de grafito serían usadas como combustible para un nuevo tipo de reactor a alta temperatura enfriado por helio.

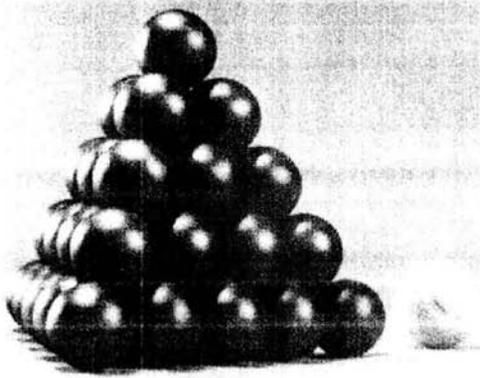


Figura 2.8. Comparación del combustible del PBMR con una pelota de tenis.
[14]

La idea echó raíces y se construyó en Alemania un reactor de demostración (el AVR) del tipo *pebble bed* de 15 MW (figura 2.9), operando exitosamente por 21 años.



Figura 2.9. El AVR en Jülich operando.

Sin embargo, debido a la ola antinuclear intensa, por lo sucedido en Chernobyl, sentimiento que barrió Europa, particularmente Alemania, la idea fue olvidada; ahora la idea ha resurgido en África del Sur.

El sistema principal de energía del PBMR consiste en dos secciones principales, las cuales son el reactor, donde la energía térmica es generada por una reacción nuclear, y la unidad de conversión de energía, donde la energía térmica se convierte en trabajo mecánico y después a energía eléctrica por medio de un ciclo termodinámico y un generador. El funcionamiento de estas dos unidades principales se describe más adelante.

2.11.1. Funcionamiento del reactor

El PBMR es un reactor de alta temperatura (HTR), enfriado por helio y utiliza grafito como moderador. El PBMR consiste en un vasija vertical de acero a presión, de 6 m de diámetro y 20 m de alto. La vasija de presión está revestida con una capa de ladrillos de grafito. Esta capa de grafito sirve como un reflector exterior para los neutrones generados por la reacción nuclear y un medio pasivo de transferencia de calor. La capa de ladrillos de grafito se perfora con agujeros verticales para alojar los elementos de control. Este reflector de grafito contiene al núcleo. El núcleo es la región del reactor en que la reacción nuclear tiene lugar. El núcleo del PBMR es de 3.7 m de diámetro y 9.0 m de altura. El núcleo consiste en dos zonas, la zona interna que contiene aproximadamente 150 000 esferas de grafito, y la zona exterior o anular la cual contiene aproximadamente 380 000 esferas de combustible y donde la reacción nuclear tiene lugar. El helio fluye a través del pebble bed (cama de esferas) y remueve el calor generado por la reacción nuclear del núcleo. Este helio es el mismo gas que se usa como fluido de trabajo en la unidad de conversión de energía, de aquí en adelante se tiene un ciclo directo de gas.

2.11.2. Operación de la unidad de conversión de energía.

La unidad de conversión de energía del PBMR está basada en el ciclo termodinámico Brayton (turbina de gas) que se muestra en el diagrama siguiente.

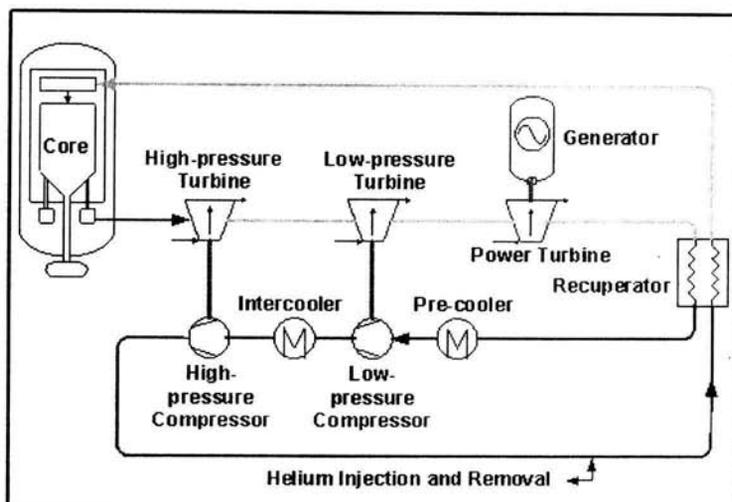


Figura 2.10. Esquema de generación utilizando el PBMR (Ciclo Brayton).

El helio entra en el reactor a una temperatura de aproximadamente 500 °C y a una presión de aproximadamente 8.4 MPa y desciende entre las esferas de combustible calientes y recoge el calor de las esferas de combustible que han elevado su temperatura por la reacción nuclear. El helio sale del reactor a una temperatura de aproximadamente 900 °C.

El helio se expande en la turbina de alta presión. Esta turbina forma parte del turbo de alta presión y éste, a su vez, acciona el compresor de alta presión. Enseguida el helio fluye a través de la turbina de baja presión la cual es parte de la unidad turbo de baja presión, la que a su vez acciona el compresor de baja presión. Finalmente el helio se expande en la turbina que acciona al generador.

En este punto el helio todavía está en una temperatura alta. Fluye a través del lado primario del recuperador donde transfiere el calor al gas de baja temperatura que regresa al reactor. El helio que atravesó el lado primario del recuperador, es enfriado, por medio de un pre-enfriador, lo cual aumenta la densidad del helio y mejora la eficiencia del compresor; el helio es comprimido por el compresor de baja presión. Por último el vapor de helio a alta presión fluye a través del recuperador donde es pre-calentado para después ser devuelto al reactor.

Del estudio de los reactores avanzados, se observa que los reactores de gas a alta temperatura pueden considerarse los más atractivos para producir hidrógeno, debido principalmente a las altas temperaturas que alcanzan y a la eficiencia de su ciclo termodinámico.

CAPITULO 3.

ANALISIS DE LAS ZONAS PRODUCTORAS DE HIDROCARBUROS DEL ESTADO DE VERACRUZ. [15]

En este capítulo se analiza en especial la zona a la cual pertenece Laguna Verde de acuerdo a las regiones en que divide PEMEX al país, con el fin de conocer si se cuenta con la materia prima para generar el hidrógeno, es decir hidrocarburos y en específico gas natural y cuales son sus producciones.

El petróleo en México, así como sus derivados sólo pueden ser explotados y elaborados por la Nación, por conducto de Petróleos Mexicanos y sus organismos subsidiarios.

Petróleos Mexicanos divide a la nación en regiones, entendiéndose ésta como el ámbito geográfico correspondiente a la división administrativa de PEMEX Exploración y Producción. Las cabeceras regionales se ubican a lo largo de la costa del Golfo de México: Poza Rica, Ver. (Región Norte), Villahermosa, Tab. (Región Sur) y Ciudad del Carmen, Cam. (Región Marina Noreste y Región Marina Suroeste).

De acuerdo a estas regiones la que compete al estado de Veracruz es la región Norte y será la región que se analizará. En esta región se encuentran incluidas las ciudades de Burgos, Veracruz, Poza Rica y Altamira.

3.1. Producción de hidrocarburos en la Región Norte.

La tabla 4 muestra las reservas y la producción de hidrocarburos en la región norte. Se presentan estas reservas ya que el método de producción de hidrógeno por el método de reformado es válido para cualquier hidrocarburo, incluso para el carbón sólido, sólo que es necesaria una mayor temperatura para lograr obtener hidrógeno; además entre más grande sea la cadena de C-H, mayor producción de CO₂ se obtendrá. Es por estos dos factores que se prefiere utilizar el gas natural, ya que la mayor parte de éste es metano, la cadena más simple de hidrocarburos que existe, ya que contiene un átomo de carbono por cuatro de hidrógeno, esto es CH₄.

Tabla 4. Reservas y producción de hidrocarburos en la Región Norte.

Reservas de producción de hidrocarburos totales (a)
(millones de barriles de petróleo crudo equivalente)

	1999	2000	2001	2002
Total				
Región norte	22 859.9	22 303.2	21 917.4	21 043.3
Probadas				
Región norte	11 341.5	11 158.8	10 943.5	10 663.3
Posibles				
Región norte	4 852.9	4 691.4	4 632.8	4 451.8
Producción de hidrocarburos (millones de barriles)	1998	1999	2000	2001
	1 489.9	1 433.8	1 468.7	1 493.6

(a) cifras al inicio de cada año

En la figura 3.1 se observa que la Región Norte proporciona el 39.8% de la producción total del país.

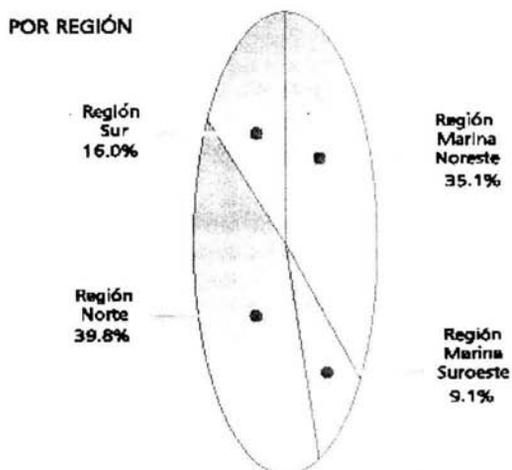


Figura 3.1. Representación gráfica de la producción de hidrocarburos por región.

3.2. Producción de Gas Natural.

Como ya se ha mencionado se puede producir hidrógeno de cualquier hidrocarburo pero entre más grande sea la cadena de C-H se necesita mayor temperatura y generará mayor porción de CO₂, es por eso que se considera la

opción de utilizar CH₄ (metano). El gas natural contiene en más de su 90% este hidrocarburo. En la tabla 5 se muestra la producción de gas natural desde 1991 hasta el 2001, en las diferentes zonas que conforman la región norte.

**Tabla 5. Producción de gas natural por zonas desde 1991 hasta el 2001.
(Producción al final de cada año)**

Producción de gas natural por región y activo
(millones de pies cúbicos diarios)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	Variación 2001/2000 (%)
Región Norte	473.4	464.0	441.4	479.2	548.4	642.6	773.2	1 037.6	1 224.5	1 265.6	1 237.7	-2.2
Burgos	233.2	238.5	215.2	238.3	302.0	386.2	486.9	735.3	970.8	1 003.1	989.7	-1.3
Veracruz	125.3	111.5	111.2	120.0	127.2	135.0	161.8	175.3	137.6	148.5	135.7	-8.6
Altamira	66.3	68.3	64.1	65.7	63.6	63.5	67.1	69.5	65.9	64.6	62.8	-2.9
Poza Rica	48.6	45.7	50.8	55.1	55.6	55.6	57.5	57.5	57.5	49.4	49.6	0.4

La tabla 6 presenta el precio del gas natural y gas licuado para el público desde 1991 hasta el 2001. En esta tabla así como en la figura 3.2 se nota el incremento de la demanda y por tanto del precio del gas natural y gas licuado, que se ha venido dando al paso de los años teniendo su máximo costo en el año 2000, alcanzando el precio de \$2.155 por cada metro cúbico, para después caer a un precio de \$0.789 por metro cúbico.

**Tabla 6 Precios del gas natural y gas licuado desde 1991 hasta el 2001.
Pesos del 2001.**

Precio al público de gas natural y gas licuado ^a
(pesos por metro cúbico)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Gas natural	0.237	0.290	0.269	0.262	0.533	1.152	0.794	0.828	0.764	2.155	0.789
Gas licuado (\$/kg)	0.446	0.600	0.807	0.986	1.400	2.430	3.130	3.280	4.200	5.650	4.890

a. Precios al 31 de diciembre de cada año, incluye impuestos

Precio del gas natural industrial (pesos de 2001/metro cubico)

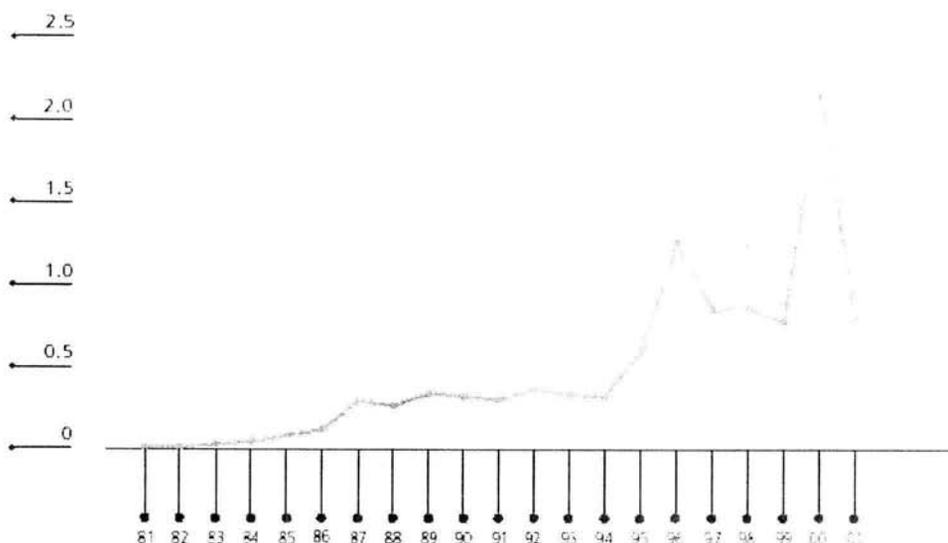


Figura 3.2. Gráfica en la que se muestra la variación del precio del gas natural a través del tiempo. (Pesos del 2001)

3.3. Principales Instalaciones Petroleras del Estado de Veracruz.

La figura 3.3. muestra las instalaciones petroleras que existen en el estado de Veracruz, esto con la finalidad de identificar mejor las instalaciones petroleras cercanas a la CNLV y que en un determinado momento se pueda aprovechar para obtener la materia prima para el proceso de reformado de vapor, es decir los hidrocarburos.

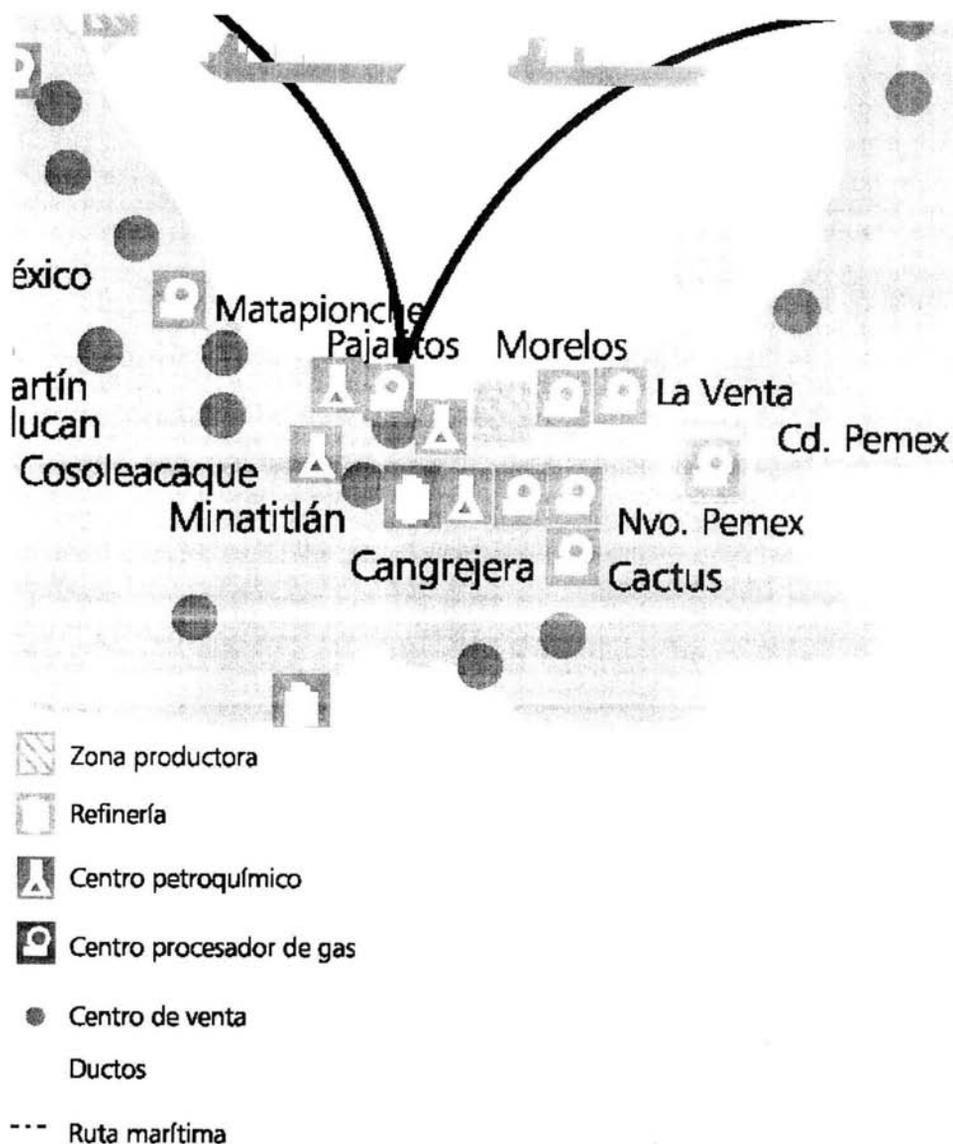


Figura 3.3. Instalaciones petroleras del estado de Veracruz.

Como ya se ha mencionado, en este trabajo se piensa en utilizar el gas natural como materia prima para el proceso de reformado de vapor, por su alto contenido de metano, es por esta razón que se ha anexado la figura 3.4, la cual muestra la red de ductos y los centros procesadores de gas del estado de Veracruz. Cerca de

la carretera que se encuentra en la CNLV pasa un ducto de gas natural del cual sería fácil después de obtener los permisos necesarios, se hiciera una derivación hacia la planta productora de hidrógeno.



Figura 3.4. Red de ductos y centros procesadores de gas del estado de Veracruz.

Finalmente en la tabla 7 se presenta la producción de hidrógeno por año, que ha tenido petróleos mexicanos desde 1991 hasta el 2001.

Tabla 7 Producción de hidrógeno de PEMEX.

Miles de toneladas.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Hidrógeno		12	11	12	18	19	15	15	12	15	2

CAPITULO 4 ANALISIS DEL SITIO DE LAGUNA VERDE.

En este capítulo se realiza un análisis del sitio de la Central LV, con el fin de estimar la posibilidad de instalar una planta productora de hidrógeno y una zona de almacenamiento. Se determina el área disponible y la ubicación de la población que rodea a la central.

Enseguida se muestra un mapa del sitio de LV, para realizar una mejor apreciación del sitio.

En la figura 4.1. se muestran los poblados más cercanos a LV que serían Monte Carmelo y San Carlos, en este último se encuentran 2 habitantes.

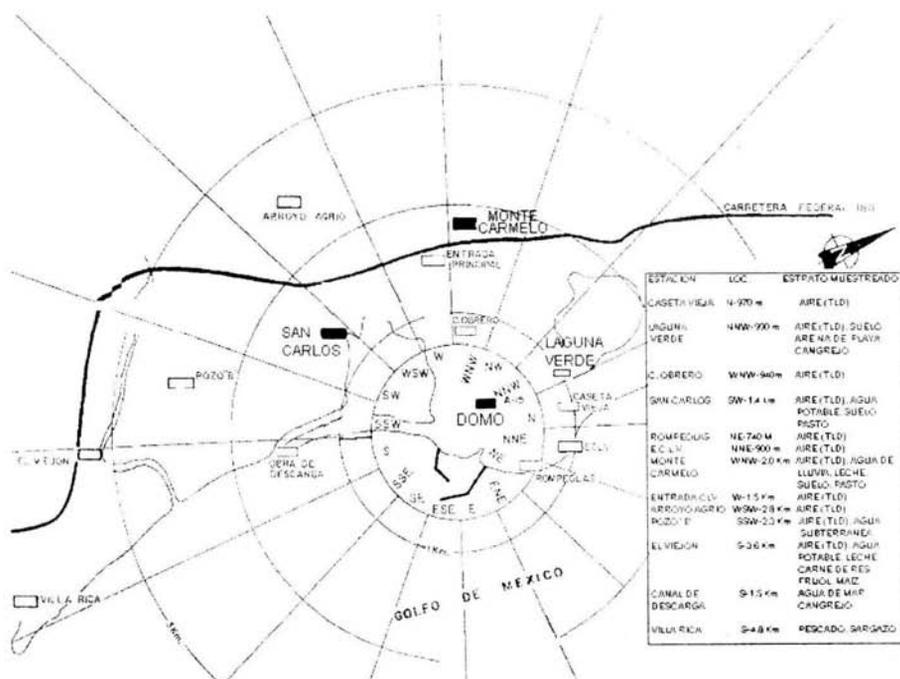


Figura 4.1. Mapa de la CNLV (3 Km).

También se muestra en la figura 4.2 el sitio de Laguna Verde, que es propiedad de CFE. Se puede distinguir en el centro la unidad I y II, en la parte superior la laguna verde y algunas construcciones de la central y en la parte inferior la zona de descarga y la laguna salada.

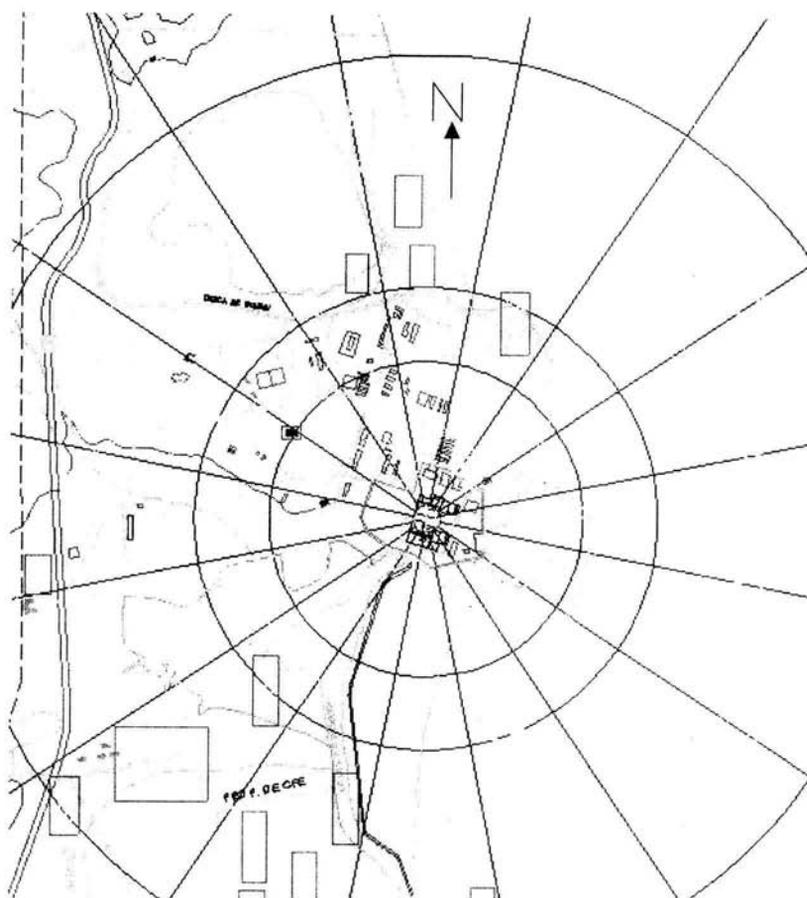


Figura 4.2. Sitio de Laguna Verde.

La figura 4.2 se dividió en dos partes, en la primera parte, mostrada en la figura 4.3, se presenta la parte superior, tomando como referencia las unidades I y II se tienen edificaciones de la central como la cafetería, casetas de vigilancia, recepción, el edificio de adiestramiento, etc.

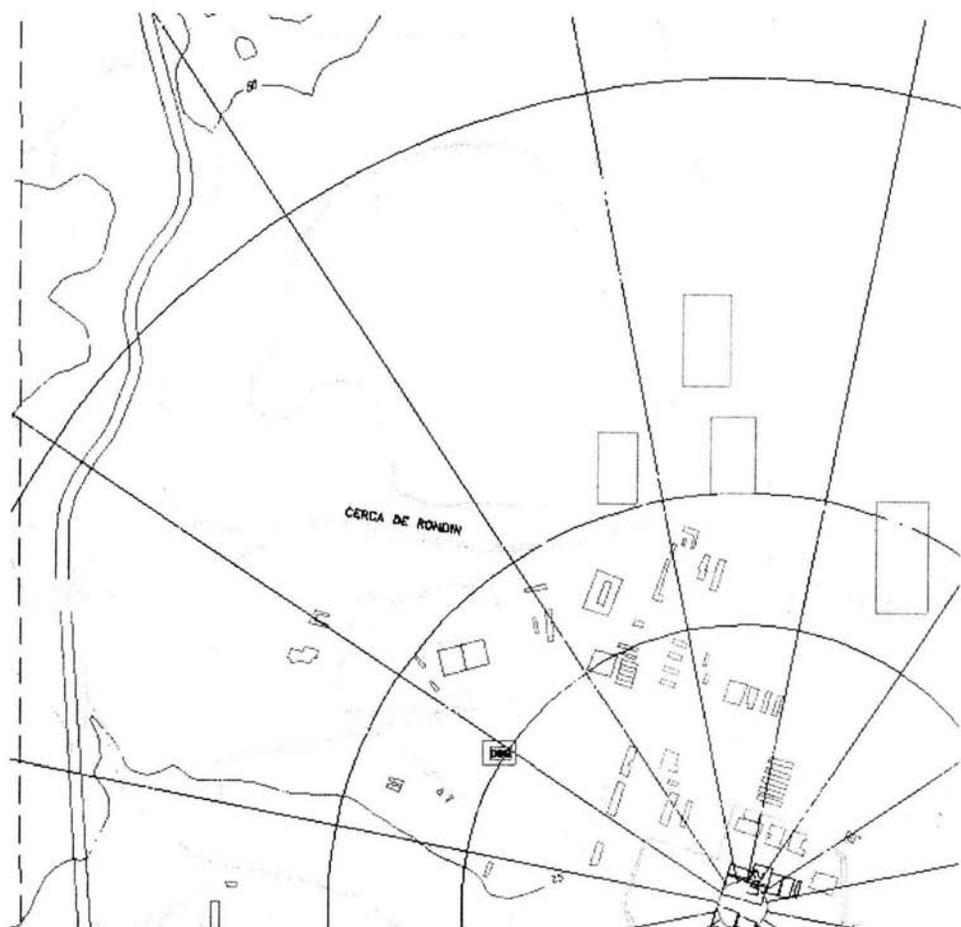


Figura 4.3. Laguna Verde y zona de edificios de la central.

En la figura 4.3 se puede apreciar que no existe una zona para poder colocar la planta productora de hidrógeno ya que en esta zona un accidente como un incendio que más adelante se analiza podría provocar grandes daños materiales y pérdidas humanas.

Por otra parte en la parte inferior, tomando como referencia las unidades I y II, se tiene la zona de descarga, la cual se muestra en la figura 4.4.

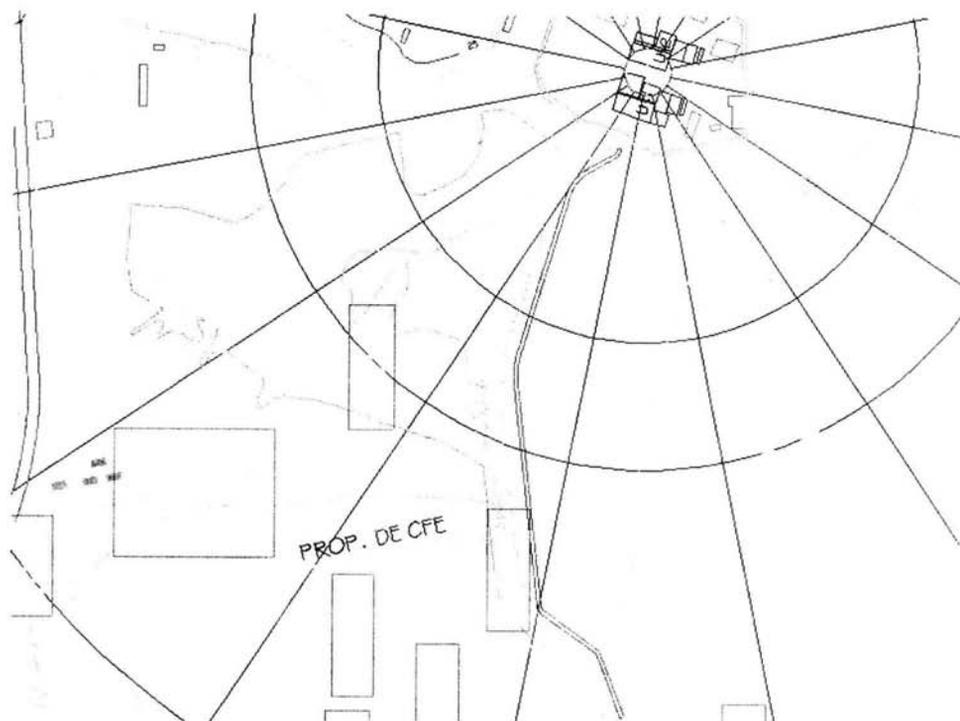


Figura 4.4. Zona de descarga de la central.

En la zona de descarga no se encuentran edificios, pero el problema es que la dirección de los vientos dominantes va orientado de esta zona hacia el edificio del reactor por lo que el flujo de calor, en caso de un accidente de incendio, se incrementaría en el edificio del reactor, además que se tiene muy cerca el poblado de San Carlos.

Después de haber sido establecidos los procesos para la obtención de hidrógeno así como los diferentes tipos de reactores nucleares, se consideró que los métodos más apropiados son el de reformado de metano con vapor y el proceso termoquímico, en específico el ciclo SI. Estos procesos requieren de una gran energía térmica, la cual será proporcionada por un reactor nuclear adecuado, entre los cuales se encuentran los reactores refrigerados por gas como el HTGR y el Pebble Bed.

4.1. Producción de Hidrógeno.

Se realizará un análisis preliminar de la producción de hidrógeno eligiendo el proceso de reformado de metano con vapor y utilizando la energía térmica de un reactor de gas de alta temperatura.

La energía requerida para el proceso tradicional de reformado es de 55MJ, con esta energía se tendrá el balance siguiente:

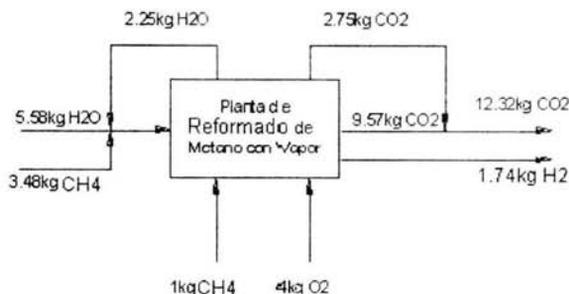


Figura 4.5. Balance de masas para 55 MJ.

Como se observa en el balance anterior, además del hidrógeno, se producen también 12.32 Kg de CO₂.

Cabe mencionar que se realizará el análisis para una producción anual de hidrógeno de 13 mil toneladas, que es el promedio de producción de hidrógeno de PEMEX en los últimos 10 años (ver tabla 7 del capítulo anterior).

Por el método tradicional de reformado de vapor con metano, para 1MWh (térmico) se tendrá el siguiente balance de masas.

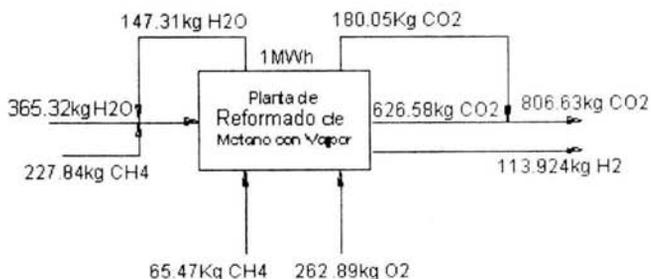


Figura 4.6. Balance de masas para 1MWh, utilizando el método tradicional de reformado de vapor con metano.

Utilizando la energía nuclear de un reactor se tendrá el siguiente balance de masas, para el mismo MWh térmico.



Figura 4.7. Balance de masas para 1MWh, utilizando un reactor nuclear para suministrar la energía requerida para el proceso de reformado de vapor con metano.

Nótese que utilizando un reactor nuclear la producción de CO₂ disminuye cerca de un 22%, esto se debe a que en el método tradicional de producción de hidrógeno a parte de utilizar el gas natural como materia prima para la producción de hidrógeno, también se utiliza como combustible para generar la energía necesaria para realizar el proceso de reformado.

Para obtener 13 mil toneladas de hidrógeno al año se necesitaría aplicar al proceso 13 Mwht y equivaldría a una producción promedio de 1,484kg de hidrógeno por cada hora. El balance de masas y energía por cada hora es el siguiente:

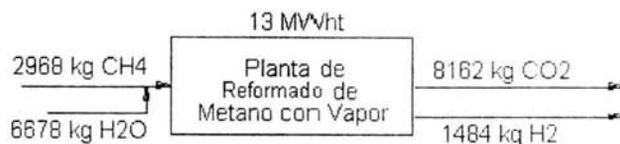


Figura 4.8. Balance de masas y energía para producir 1,484 toneladas de hidrógeno por cada hora, es decir 13 mil toneladas de hidrógeno al año.

Cada módulo del Reactor Modular Enfriado por Helio (por sus siglas en inglés MHR) tiene una capacidad de 600 MWt, por lo que para la producción de 13 mil toneladas de hidrógeno al año por el proceso de reformado de metano sólo se utiliza una pequeña parte de la energía del reactor, por lo que la otra parte se puede utilizar para generar electricidad o utilizarlo en otro proceso.

4.2. Análisis del Accidente de Incendio del Hidrógeno Almacenado.

La masa de hidrógeno producido deberá de ser almacenada, así que se realizó un análisis de los efectos causados a diferentes distancias debido a la radiación térmica, en el caso en el que el depósito de hidrógeno se incendiara. En el anexo A se encuentra un desarrollo más amplio de este análisis, aquí sólo se presentan los resultados.

La tabla 8 muestra las variables y sus unidades para realizar el análisis.

Tabla 8. Variables y sus unidades para el análisis de flujo de radiación de calor. [16]

Fracción de radiación	n.
Calor de combustión	Hc [J/Kg]
Masa	m [Kg]
Radio de la bola de fuego	r [m]
Duración de la bola de fuego	t [s]
Energía radiada	Qr [J]
Potencia radiada	Qr/t [KW]
Flujo de radiación de calor	qR [KW/m ²]
Distancia del centro de la bola de fuego	r [Km]
Area de la semiesfera	A [m ²]

Si se pudieran almacenar las 13 mil toneladas de hidrógeno y esta masa almacenada se incendiara, los resultados serían los mostrados en la tabla 9, en donde se muestran diferentes distancias tomando como origen en donde se encuentra el incendio, así como el área de la semiesfera que describiría esta distancia, y se compara el flujo de radiación de calor para estas distancias tanto para el propano como el del hidrógeno, con el fin de comparar la energía radiada por ambos combustibles.

Como se puede observar en la tabla 9, la radiación de calor es mayor para el hidrógeno que para el propano, esto se debe al poder calorífico del hidrógeno que es mucho mayor (142,000,000 J/Kg) que el del propano (76,114,506.82 J/Kg).

Por otro lado se puede ver el efecto que causa esta radiación para diferentes distancias tomando como centro el lugar del incendio; es muy grande para distancias pequeñas y esto afectaría a la misma central nuclear así como a los poblados más cercanos. La comparación de la radiación calorífica entre el propano y el hidrógeno de acuerdo a la distancia a la cual se encuentre se puede observar en la figura 4.9. (Ver anexo A)

Tabla 9. Resultados del análisis de flujo de radiación de calor, para la misma masa de hidrógeno y propano y diferentes distancias.

Para m = 13 mil toneladas			
r [Km]	A [m ²]	qR Propano	qR Hidrógeno
0.5	3141632	272.8966	509.1186712
1	12566528	68.224149	127.2796678
1.5	28274688	30.321844	56.56874125
2	50266112	17.056037	31.81991695
2.5	78540800	10.915864	20.36474685
3	113098752	7.580461	14.14218531
3.5	153939968	5.5693183	10.39017696
4	201064448	4.2640093	7.954979238
4.5	254472192	3.3690938	6.285415694
5	314163200	2.728966	5.091186712

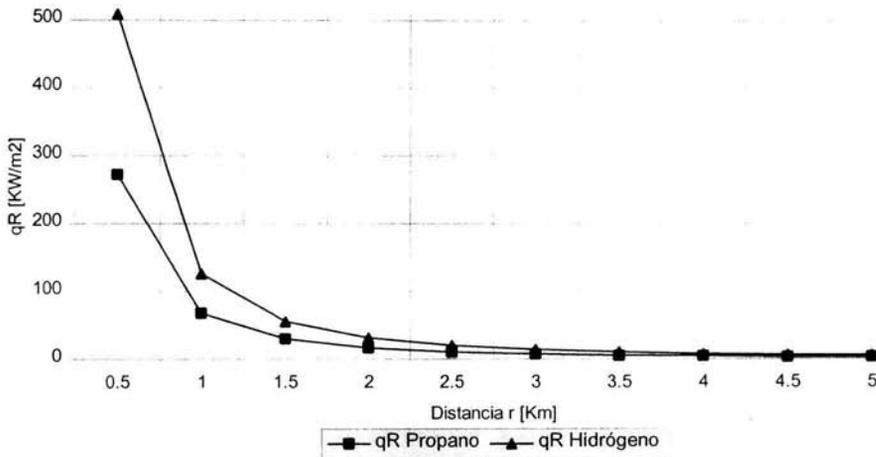


Figura 4.9. Gráfica comparativa flujo de calor propano e hidrógeno m=13mil toneladas

Este mismo análisis se realizó para diferentes cantidades de hidrógeno y de propano para comparar la magnitud de la energía radiada, con base a la masa almacenada.

Se analizó para una masa de 13 mil toneladas, 5 mil toneladas y 2 mil 500 toneladas. Los resultados se graficaron en la figura 4.9, 4.10 y 4.11 respectivamente; este análisis se llevó a cabo para poder conocer los diferentes niveles de radiación de calor del propano y del hidrógeno y con ayuda de la tabla 12, considerar los efectos causados a diferentes distancias.

Tabla 10. Resultados del análisis de flujo de radiación de calor, para la misma masa de hidrógeno y propano y diferentes distancias.

Para m = 5 mil toneladas			
r [Km]	A [m ²]	qR Propano	qR Hidrógeno
0.5	3141632	143.45677	267.6344168
1	12566528	35.864193	66.90860419
1.5	28274688	15.939641	29.73715742
2	50266112	8.9660483	16.72715105
2.5	78540800	5.7382709	10.70537667
3	113098752	3.9849103	7.434289354
3.5	153939968	2.9276892	5.461926873
4	201064448	2.2415121	4.181787762
4.5	254472192	1.7710713	3.304128602
5	314163200	1.4345677	2.676344168

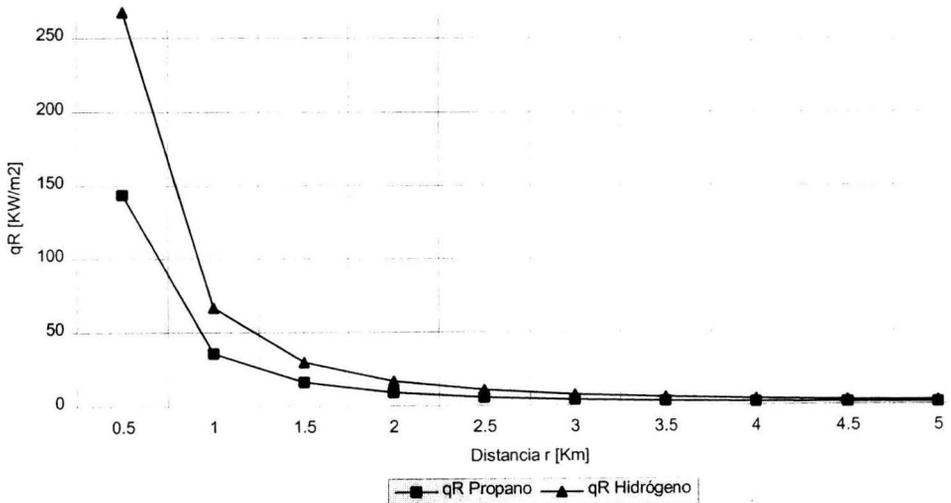


Figura 4.10. Gráfica comparativa flujo de calor propano e hidrógeno m=5mil toneladas

Tabla 11. Resultados del análisis de flujo de radiación de calor, para la misma masa de hidrógeno y propano y diferentes distancias.

Para m = 2.5 mil toneladas			
r [Km]	A [m ²]	qR Propano	qR Hidrógeno
0.5	3141632	89.976246	167.8606012
1	12566528	22.494061	41.9651503
1.5	28274688	9.9973606	18.65117791
2	50266112	5.6235153	10.49128757
2.5	78540800	3.5990498	6.714424048
3	113098752	2.4993402	4.662794478
3.5	153939968	1.8362499	3.425726555
4	201064448	1.4058788	2.622821894
4.5	254472192	1.1108178	2.072353101
5	314163200	0.8997625	1.678606012

Para la masa de 2 mil 500 toneladas, se puede observar que también, podría llegar a causar un daño severo a la misma central y a los habitantes de los poblados cercanos.

Con el fin de encontrar una cantidad de masa adecuada para almacenar, sin causar daños tan severos, se realizó otro análisis, el cual se presenta mas adelante en este mismo capítulo.

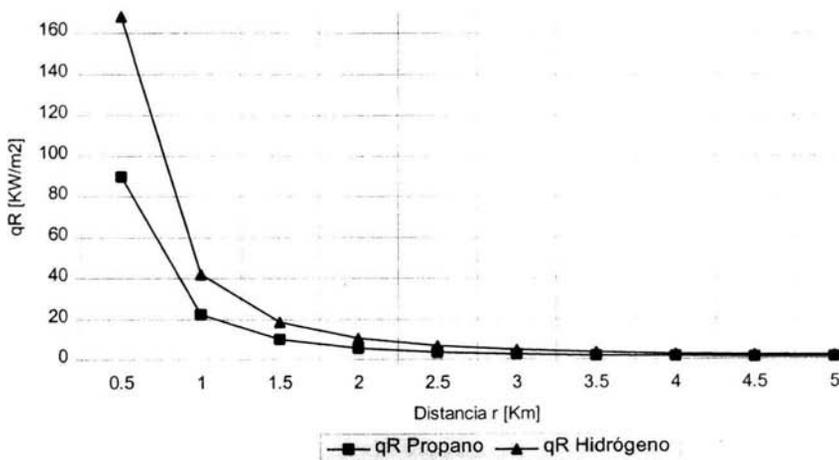


Figura 4.11. Gráfica comparativa flujo de calor propano e hidrógeno m=2.5mil toneladas

Los efectos causados dependiendo del nivel de flujo de radiación de calor se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Efectos del flujo de calor en la salud humana y la central. [16]

Flujo de Calor (KW/m ²)	Efecto.
1.75	Se alcanza el umbral del dolor después de 1 minuto.
2	Daño al aislante de PVC de los cables.
5	Se alcanza el umbral del dolor después de 15 segundos.
6.4	Se alcanza el umbral del dolor después de 8 segundos, quemaduras de segundo grado después de 20 segundos
12.5	La madera se enciende en una exposición prolongada en presencia de llama
15	Límite para materiales de construcción clase 2 .
16	Severas quemaduras después de 5 segundos.
25	La madera se enciende en una exposición prolongada.
30	Límite para materiales de construcción clase 1.

Dependiendo de la masa de hidrógeno que se desee almacenar y la distancia de la zona de almacenamiento, serían los efectos que se causarían en los seres humanos y en los edificios. El poblado más cercano a LV se encuentra a más de 1Km de distancia, por lo tanto los efectos causados para los habitantes de dicho poblado serían severos.

Se hizo una modificación en las ecuaciones para calcular el flujo de radiación térmica, y ahora lo que hacemos es dejar fija la distancia e ir variando la masa de hidrógeno almacenada. De esta forma sabremos, dependiendo del flujo de radiación que queramos, la cantidad de hidrógeno que podemos almacenar. Por ejemplo si deseamos un flujo de radiación térmica de 5 KW/m², que causaría según la tabla 10 el umbral del dolor después de 15 segundos, se tendrían para una distancia de 1.5 Km de la zona de almacenamiento los siguientes resultados:

Tabla 13. Resultados del análisis de flujo de radiación de calor, para 1.5 Km. y diferentes masas.

Para una distancia de 1.5 Km.

r=1.5 Km		
m [Tons]	A [m ²]	qR Hidrógeno
0.05	28274688	0.012832151
0.1	28274688	0.020459388
0.2	28274688	0.03262014
0.3	28274688	0.042854383
0.4	28274688	0.052009061
0.5	28274688	0.06043652
1	28274688	0.096359079
1.5	28274688	0.126590774
2	28274688	0.153633465
2.5	28274688	0.178527969
3	28274688	0.201834426
4	28274688	0.244950885
5	28274688	0.284642308
10	28274688	0.453829413
15	28274688	0.596213844
20	28274688	0.723578787
25	28274688	0.840826256
50	28274688	1.340600731
100	28274688	2.137433634
150	28274688	2.808032023
300	28274688	4.477084006
500	28274688	6.31392548
1000	28274688	10.06682778
2000	28274688	16.05039874
4000	28274688	25.59051424
5000	28274688	29.73715742

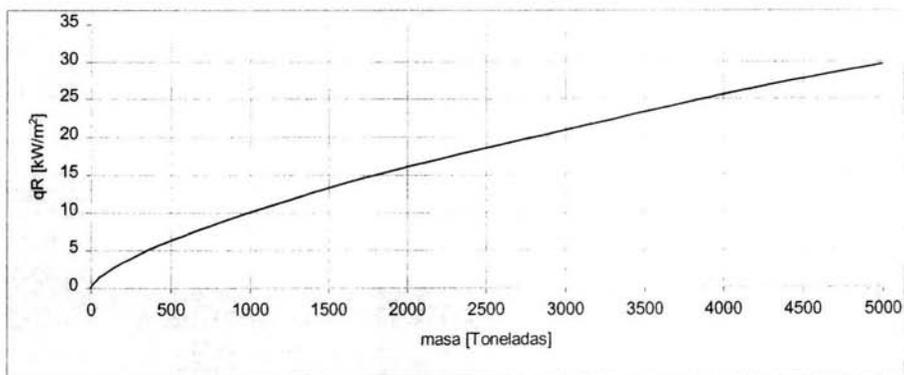


Figura 4.12. Resultados de flujo de radiación de calor para una distancia de 1.5 Km y diferentes masas.

Tabla 14. Resultados del análisis de flujo de radiación de calor, para 1 Km. y diferentes masas.

Para una distancia de 1 Km se tienen los siguientes resultados:

r=1 [Km]		
m [Tons]	A [m ²]	qR Hidrógeno
0.05	12566528	0.02887234
0.1	12566528	0.04603362
0.2	12566528	0.07339532
0.3	12566528	0.09642236
0.4	12566528	0.11702039
0.5	12566528	0.13598217
1	12566528	0.21680793
1.5	12566528	0.28482924
2	12566528	0.3456753
2.5	12566528	0.40168793
3	12566528	0.45412746
4	12566528	0.55113949
5	12566528	0.64044519
10	12566528	1.02111618
15	12566528	1.34148115
20	12566528	1.62805227
25	12566528	1.89185908
50	12566528	3.01635164
100	12566528	4.80922568
150	12566528	6.31807205
300	12566528	10.073439
500	12566528	14.2063323
1000	12566528	22.6503625
2000	12566528	36.1133972

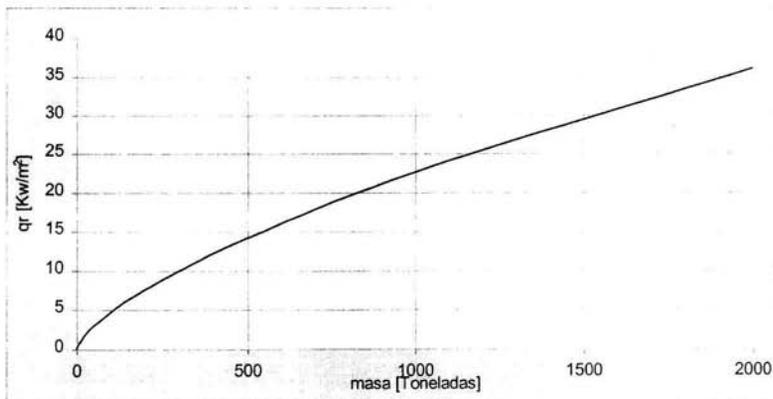


Figura 4.13. Resultados de flujo de radiación de calor para una distancia de 1 Km y diferentes masas.

De las tablas 13 y 14 y de las gráficas 4.12 y 4.13 se puede apreciar que si se quiere un nivel de radiación térmica para 1.5 Km de 5 KW/m^2 , es necesario que se almacenen como máximo 350 toneladas de H_2 , y para 1 Km y el mismo nivel de radiación térmica se tendrían que almacenar como máximo 105 toneladas. Ahora si se desea una producción anual de 13 mil toneladas, el combustible debe de tener para 350 toneladas, un ciclo de almacenamiento de 9.8 días, y para 105 toneladas el ciclo de almacenamiento deberá de ser de 3 días.

Para estos resultados se utilizaría un 2.71% de la potencia del reactor nuclear con un factor de planta de 80% y un modulo HTGR (600Mw). El resto de la potencia podría ser utilizado para otros propósitos como generación de energía eléctrica.

Con respecto a la materia prima, en este caso el gas natural se utilizaría el 0.35% de producción de gas natural de Veracruz (ver tabla 5 del capítulo 3), considerando la producción del 2001 y una concentración del 90% de metano, a una temperatura de 20°C y presión de 1 atm.

Cabe recordar que las 13 mil toneladas de hidrógeno anuales son el promedio de la producción de PEMEX desde 1992 hasta el 2001 (ver tabla 7 del capítulo anterior), pero si en el futuro, el hidrógeno se convierte en un energético secundario importante, entonces se podría utilizar toda la potencia de uno o varios reactores y desde luego una mayor cantidad de gas natural.

En la propiedad de CFE dentro de LV, se tiene un área restringida de 600m a la redonda del reactor nuclear, la planta de hidrógeno y el lugar donde se puede almacenar podrían colocarse fuera de esta zona de restricción, pero debemos de tomar en cuenta las construcciones que ya están edificadas en LV como el comedor, el centro de información, el centro de capacitación, etc. Por lo que no podría colocarse ahí ni la planta de hidrógeno, ni la zona de almacenamiento, tenemos que pensar en colocarlo en otra parte, un sitio interesante para analizar el sitio de producción y almacenaje sería a un lado de la laguna del otro lado de los edificios, pero el inconveniente es que los vientos dominantes soplan del lugar donde se colocaría la planta productora y el sitio de almacenamiento, hacia el reactor y los edificios, por lo que si ocurriera una explosión, las llamas y el flujo de radiación de calor (ver tabla 13 y 14) se orientaría hacia los edificios provocando daños severos.

Por lo tanto se puede concluir que la planta de producción de hidrógeno, así como la zona de almacenamiento no se pueden colocar del lado de los edificios, porque provocaría un daño a éstos y a las personas que se encuentren ahí, y si se coloca del otro lado de la laguna, se tiene el problema de los vientos dominantes que atraerían la mayor parte del flujo de radiación de calor al edificio del reactor y construcciones ya edificadas, en caso de un accidente.

CAPITULO 5

ANALISIS ECONOMICO

En esta etapa de desarrollo de las plantas de producción de hidrógeno a partir de reactores nucleares, es difícil poder proporcionar datos económicos confiables, por lo tanto en este capítulo se presentarán solamente algunos datos recopilados de la literatura, que den una idea de los costos de los sistemas estudiados en esta tesis.

En el análisis de K. R. Schultz [17] de la compañía General Atomics, se tienen unos costos preliminares de un reactor HTGR (MHR) produciendo hidrógeno por los métodos de reformado y el proceso termoquímico SI. Se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Comparación de costos para el proceso SI y de reformado.

COSTO DE CAPITAL	SI	REFORMADO
1 Módulo = 600MWt		
GT-MHR \$/KWt	468	468
MHR \$/KWt	371	371
CICLO INTERMEDIO \$/KWt	43	43
PLANTA DE H \$/KWt	255	53.43
TOTAL DE LA PLANTA \$/KWt	669	467.43
COSTO DE OPERACIÓN		
GT-MHR \$/MWth	5	5
MHR \$/MWth	4.5	4.5
CICLO INTERMEDIO \$/MWth	0.1	0.1
PLANTA DE H \$/MWth	2.2	2.2
TOTAL DE LA PLANTA \$/MWth	6.8	6.8
Costo de capital \$/MWth	11.5	8.035
Costo de operación \$/MWth	6.8	6.8
Costo total \$/MWth	18.3	14.835
Costo del H ₂ \$/Kg	1.42	1.15

Como se puede apreciar el costo menor es para el de reformado, pero hay que considerar que produce CO₂ y que esto cuesta si hay que "secuestrarlo", se incrementaría el costo del hidrógeno 20 centavos de dólar por cada Kg, por lo tanto el costo total del hidrógeno por el proceso de reformado sería alrededor de 1.35 \$/Kg, mientras que para el proceso S-I se podría vender el oxígeno que genera este proceso y eso lo pone más competitivo.

Para el proceso de secuestro del CO₂ se puede considerar el mar como un sumidero alternativo a la atmósfera dada su inmensa capacidad de absorber CO₂, así como del gran tiempo de residencia que presenta.

De acuerdo a Socolow [18], es suficiente en el corto plazo descargar un flujo de CO₂ al mar a una profundidad superior a 1000 m, con lo que se asegura una solubilidad total y un tiempo de residencia adecuado. Es necesario señalar que no se ha encontrado en la literatura ningún reporte técnico del proceso ni de las consideraciones asumidas.

De acuerdo a esto, la sección de tratamiento del CO₂ estará compuesta por una pila de compresores que permitan llevar el CO₂, mediante alguna canalización adecuada, a las profundidades recomendadas. Otra forma de limitar este problema es el de incrementar organismos fijadores de CO₂, es decir organismos fotosintéticos como árboles y/o fitoplancton. El proceso de secuestro, como ya se mencionó, incrementaría el costo del proceso de reformado 20 centavos de dólar/Kg, lo cual sigue siendo costeable, y tal vez en el futuro se pueda utilizar el hidrógeno para mover vehículos, generar electricidad en nuestra casa y en fin se podría desarrollar nuevas tecnologías en que aplicar este combustible.

Por otro lado Ogawa M. [7] tiene una comparación de diferentes plantas productoras de hidrógeno y su razón de costos, los cuales se muestran en la figura 5.1.

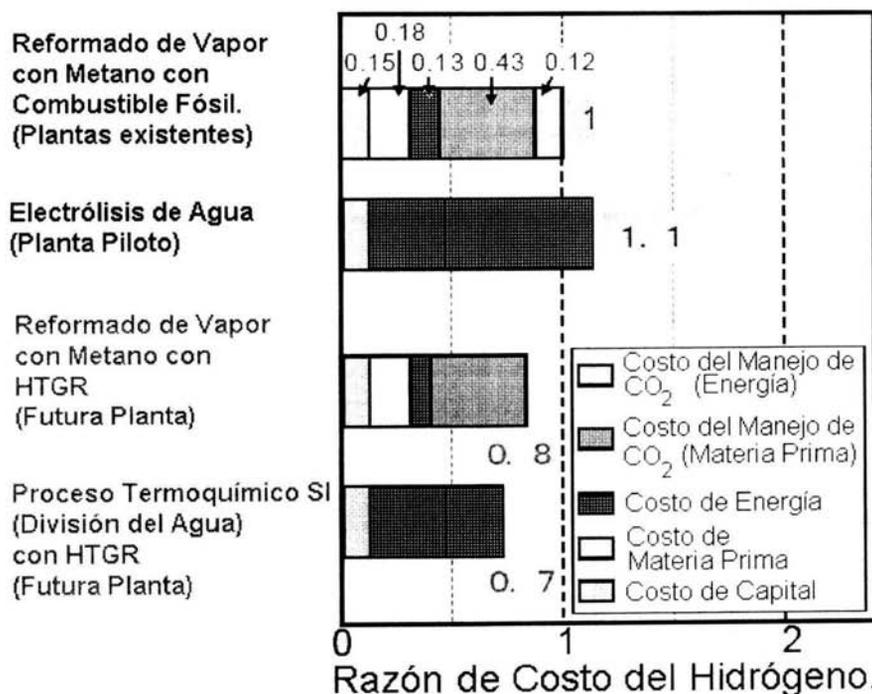


Figura 5.1. Prospecto de Costo, Incluyendo Costo de Manejo del CO₂.

Como se puede ver, Ogawa predice que el costo del proceso de reformado de vapor con metano con un HTGR será 14.29% más costoso que el proceso termoquímico S-I con un HTGR, esto difiere del análisis de K. R. Schultz, quien nos dice que la producción de reformado de vapor con metano es menos costosa que la del proceso termoquímico S-I, cerca de un 20%.

Comparado el proceso de reformado de vapor con metano utilizando combustible fósil, con el mismo proceso pero utilizando un HTGR, según Ogawa el costo de utilizar el HTGR disminuiría en un 20% del proceso con combustible fósil.

Por otro lado si se compara el proceso de reformado de vapor con metano utilizando combustible fósil, con el proceso termoquímico S-I utilizando el HTGR, el costo se disminuiría en un 30%.

Si se comparan, en la figura 5.1, estos nuevos procesos con la base que en este caso es el proceso de reformado de metano con vapor de la planta existente, se observa que Ogawa no contempla el manejo de CO₂ para el proceso de reformado de metano con vapor utilizando la energía del reactor nuclear y que según él lo único que se reduce es el costo de la energía, mientras que para el proceso S-I, el costo de la energía aumenta, pero al no generar CO₂, no se tiene un gasto por su manejo y el costo de la materia prima, al ser agua, lo desprecia. Para los tres procesos el costo de capital es similar.

Se presentan ambos análisis y se aclara que aun es difícil decir con exactitud el costo de producir hidrógeno utilizando energía nuclear, ya que no existen antecedentes, pero se estima que los costos más viables sean los del estudio de K. R. Schultz, debido a que desglosa mejor los diferentes componentes de la planta y son más recientes.

Finalmente cabe recordar que el proceso de reformado de metano con vapor ya es utilizado actualmente para producir hidrógeno, mientras que el proceso S-I aún está en etapa de desarrollo tecnológico.

Conclusiones.

La producción de hidrógeno a gran escala por medios nucleares es una opción que se debe considerar en el futuro. Requiere aún bastante trabajo de investigación, en particular el método S-I (más prometedor por ser el más limpio). Probablemente la opción de utilizar el sitio de LV no sea el más adecuado, dado la cercanía de la población y lo reducido del sitio, más el efecto de los vientos dominantes y la necesidad de colocar un reactor de alta temperatura.

El trabajo aquí presente hace notar que utilizando el método de reformado de metano con vapor aparte de producir CO₂, se sigue dependiendo de los combustibles fósiles, pero existen otros métodos que no contaminan y los cuales no dependen de combustibles fósiles como el proceso S-I o el de electrólisis a alta temperatura, el problema es hacerlo costeable y producirlo a gran escala. Sin embargo con los avances en los diseños de los nuevos reactores nucleares, ese problema puede salvarse. Los nuevos reactores nucleares de alta temperatura, como el HTGR y el PBMR, así como algunos de la Generación IV, podrán ser utilizados para la producción a gran escala de hidrógeno, gracias a su temperatura de operación y a su alta eficiencia termodinámica. Aún falta mucho por hacer, ya que si bien es cierto que la producción de hidrógeno a gran escala es posible, deben tomarse las precauciones necesarias para poder transportarlo y almacenarlo, desarrollar más tecnología en ductos, tanques, pipas, etc. y empezar a producir celdas de combustible de gran eficiencia y bajo costo. Los costos del hidrógeno por el proceso de reformado son costeables y más baratos que otros procesos como el SI que produce hidrógeno a un costo de 1.42 dólares/Kg, pero este costo podría disminuir si se vende el oxígeno que también se genera.

Para poder producir 13 mil toneladas al año sólo se ocuparía el 2.71% de la potencia de un modulo del HTGR (600MWt) por lo que se podría utilizar la capacidad restante en otro proceso como producción de energía eléctrica o bien si aumentara la demanda de hidrógeno se utilizaría toda la capacidad del reactor para producirlo. Por lo que respecta al análisis de un accidente de incendio del hidrógeno almacenado, se encontró que para tener un nivel de radiación de calor de 5 KW/m², el cual provocaría dolor después de 15 segundos de exposición a una distancia de 1 Km, y mantener la producción anual de 13 mil toneladas al año se deberían almacenar 105 toneladas y debe de tener un ciclo de almacenamiento de 3 días; mientras que para una distancia de 1.5 Km. con el mismo nivel de radiación y la misma producción anual se debe de almacenar 350 toneladas con un ciclo de almacenamiento de 9.8 días.

En el proceso de reformado se genera, además del hidrógeno, dióxido de carbono que es el principal causante del efecto invernadero y un gran contaminante en nuestro país; pero existen procesos para limitar este problema como el secuestro de CO₂. Este puede ser entendido como un cambio en la tecnología energética dominante, esto es que el CO₂ que eventualmente terminaría en la atmósfera, sea almacenado en forma estable, pudiendo ser bombeado a acuíferos salinos a kilómetros de profundidad o bien al fondo del océano, de modo que no entre a la

atmósfera. El secuestro del carbón corresponde a la sección de tratamiento del CO_2 generado en el proceso de producción de hidrógeno, sin embargo, no consiste de alguna unidad o equipo particular.

El análisis preliminar presentado en esta tesis arrojó como resultado que el sitio de Laguna Verde no es un sitio adecuado para colocar una zona de producción de hidrógeno. En principio se pensó en Laguna Verde por la infraestructura petrolera que se tiene en la zona, la infraestructura nuclear ya existente y la cercanía del mar para el proceso de secuestro; sin embargo es aconsejable buscar y seleccionar otro lugar en el cual se pueda colocar una planta productora de hidrógeno utilizando la energía nuclear. Se debe analizar a detalle cada uno de los rincones de nuestro país para encontrar el sitio óptimo para este fin, aparte de que se deben librar muchas dificultades, como el desarrollo de tecnología para hacer más segura la transportación y almacenamiento del hidrógeno, para reducir al mínimo las fugas que pudieran causar un incendio. Es necesario también desarrollar aplicaciones más eficientes como la utilización de celdas de combustible, analizar a fondo materiales o aleaciones que resistan la corrosión y altas temperaturas en el proceso S-I, buscar nuevos procesos de producción de hidrógeno y analizarlos para conocer si son más eficientes, baratos y con bajo impacto ambiental que los aquí presentados. El desarrollo de la electrólisis a alta temperatura es un proceso prometedor que se encuentra también en investigación. Se trabaja también en diseñar nuevos reactores nucleares que alcancen temperaturas mayores, ya que el proceso de reformado es más eficiente entre más se incremente la temperatura y desde luego será necesario abrir el mercado a este nuevo combustible.

Finalmente cabe mencionar la necesidad de realizar los análisis de seguridad, para cuantificar el efecto mutuo entre el reactor nuclear y la planta de hidrógeno al suceder algún accidente en una u otra instalación, estudios actuales sugieren que el reactor tipo HTGR se construya bajo tierra y la planta de hidrógeno se ubique en la superficie a unos 500 o 1000 metros de distancia.

REFERENCIAS.

- [1] Schulten R. "Possible New Developments Based on HTGR Technology and Operating Experience". International Atomic Energy Agency Bulletin, Vol. 31/3, 1997, p. 40.
- [2] Kupitz J., Dee J. "International Status of HTGRs". International Atomic Energy Agency Bulletin, Vol. 26/4, 1984, p. 5.
- [3] Kupitz J., Mourogov V. "The Role of Small and Medium-Sized Reactors". The Uranium Institute Annual Symposium. 1998.
- [4] Celdas de Combustible de Acido Fosfórico (PAFC)
<http://home.worldonline.es/anroalmi/proyect0.htm> Febrero (2003)
- [5] Dicks, A.L., Hydrogen Generation from Natural Gas for the Fuel Cell System of tomorrow, J. Power Sources 61, 113-124 (1996)
- [6] Fernández M. Arturo., Empleo de las celdas solares en la producción de hidrógeno. Departamento de Materiales Solares, CIE-UNAM.
http://www.iie.org.mx/mproquim/hidrógeno/gen_pag4.htm (2003)
- [7] M. Ogawa, "Nuclear Production of Hydrogen", *IEA Renewable Energy Working Party Seminar*, Paris, Francia 3 de Marzo del 2003, memorias en CD (2003).
- [8] Orlando Jorquera C.; José Hernández P.; Leandro Herrera Z.
Producción biofotolítica de Hidrógeno.
<http://cabierta.uchile.cl/revista/16/articulos/paper5/> (2003)
- [9] WEBELEMENTS, Tema 1, El Hidrógeno.
<http://www.webelements.com/webelements/elements/text/H/key.html> (2003)
- [10] Scholz, W.H., Verfahren zur großtechnischen Erzeugung von Wasserstoff und ihre Umweltproblematik, Linde Berichthe aus Technik und Wissenschaft 67(1992)
- [11] World Nuclear Association. Reactores Nucleares.
<http://mitosyfraudes.8k.com/articulos/NukeReactores.html> (2003)
- [12] World Nuclear Association. Reactores Nucleares Advanced Reactors.
<http://www.world-nuclear.org/info/inf08.htm> (2003)
- [13] "Gas Turbine - Modular Helium Reactor"
<http://www.ga.com/gtmhr/index.html> (2003)
- [14] "Pebble Bed Modular Reactor" <http://www.pbmr.com> (2003)
- [15] PEMEX "ANUARIO 2003"
- [16] H. R.Greenberg, J.J. Cramer, *Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry*, Van Nostrand Reinhold, New York, E.U (1991)

- [17] K. R. Schultz, L. C. Brown, G. E. Besenbruch, C. J. Hamilton," Large-Scale Production of Hydrogen by Nuclear", *National Hydrogen Association Meeting*, Washington DC, March 2003.
- [18] SOCOLOW, Robert (ed.). Fuel decarbonization and carbon sequestration: report of a workshop. Princeton University, USA, 1997.
<http://www.princeton.edu/~ceesdoe/>. (2003).

ANEXO A

Análisis de Incendio [16]

En este anexo se explica el análisis de incendio que se presenta en el capítulo 4; se introducen las ecuaciones y las tablas con los parámetros necesarios para dicho análisis.

Un BLEVE (explosión de vapor debido a la expansión de un líquido hirviendo: Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) puede resultar de una rápida descarga y vaporización de un químico volátil seguido de una ruptura catastrófica de un tanque el cual contiene un químico con un punto de ebullición atmosférica debajo de la temperatura ambiente. El mayor peligro de un BLEVE es la intensa radiación térmica. Los efectos de presión más allá del campo cercano no son importantes. Generalmente, sólo unos fragmentos se generan, pero estos son grandes y pueden viajar a unos 1000 metros. Las características de una bola de fuego pueden ser estimadas con los modelos presentados por Moorhouse y Pritchard, y Roberts.

Estas ecuaciones están basadas en estimaciones de incidentes actuales.

El radio de la bola de fuego, r , en metros esta dada por

$$r = 2.665m^{0.327} \quad (14)$$

donde la masa del químico soltado, m , es dado en kilogramos.

La duración de la bola de fuego en segundos, t , puede ser calculada por

$$t = 1.089m^{0.327} \quad (15)$$

La radiación de energía soltado por la bola de fuego en Joules, Q , es

$$\frac{Q_R}{t} = \frac{H_c m \eta}{t} \quad (16)$$

donde H_c es el calor de combustión en J/Kg y la fracción de radiación, η , está dada por Roberts como

$$\eta = 0.27P_o^{0.32} \quad (17)$$

donde P_o es la presión inicial de almacenamiento del químico en Mpa. El flujo de radiación de calor fuera de la bola de fuego puede ser estimado por la ecuación

$$q_R = \frac{(Q_R / t)}{A_r} \quad (18)$$

donde A_r es el área semiesfera con radio r .

Para una masa de 10 mil toneladas se tienen los siguientes resultados.

n
Hc [J/Kg]
m [Kg]
r [m]
t [s]
Qr [J]
Qr/t [KW]
qR [KW/m²]
r [m]
A [m²]

HIDROGENO

m	Hc	n	r	t	Qr	Qr	Qr/t
						KW*s	
10000000	142000000	0.2	518.4385	211.8497129	2.84E+14	2.84E+11	1.341E+09

PROPANO

m	Hc	n	r	t	Qr	Qr	Qr/t
						KW*s	
10000000	76114506.82	0.2	518.4385	211.8497129	1.5223E+14	1.522E+11	718570781

Para m=1E+7			
r	A	qR Hidrógeno	qR Propano
500	3141632	426.712287	228.725319
1000	12566528	106.6780718	57.1813297
1500	28274688	47.41247633	25.4139243
2000	50266112	26.66951794	14.2953324
2500	78540800	17.06849148	9.14901275
3000	1.13E+08	11.85311908	6.35348108
3500	1.54E+08	8.708414021	4.66786365
4000	2.01E+08	6.667379485	3.57383311
4500	2.54E+08	5.268052926	2.82376937
5000	3.14E+08	4.26712287	2.28725319

Para una masa de 5 mil toneladas se tienen los siguientes resultados.

HIDROGENO

						Qr	
m	Hc	n	r	t	Qr	KW*s	Qr/t
5000000	142000000	0.2	413.2952	168.8849973	1.42E+14	1.42E+11	840808848

PROPANO

						Qr	
m	Hc	n	r	t	Qr	KW*s	Qr/t
5000000	76114506.82	0.2	413.2952	168.8849973	7.611E+13	7.611E+10	450688385.9

Para m=5E+6			
r	A	qR Hidrógeno	qR Propano
500	3141632	267.6344168	143.45677
1000	12566528	66.90860419	35.864193
1500	28274688	29.73715742	15.939641
2000	50266112	16.72715105	8.9660483
2500	78540800	10.70537667	5.7382709
3000	1.13E+08	7.434289354	3.9849103
3500	1.54E+08	5.461926873	2.9276892
4000	2.01E+08	4.181787762	2.2415121
4500	2.54E+08	3.304128602	1.7710713
5000	3.14E+08	2.676344168	1.4345677

Para una masa de 2 mil 500 toneladas se tienen los siguientes resultados.

HIDROGENO

						Qr	
m	Hc	n	r	t	Qr	KW*s	Qr/t
2500000	142000000	0.2	329.4759	134.633849	7.1E+13	7.1E+10	527356236.3

PROPANO

						Qr	
m	Hc	n	r	t	Qr	KW*s	Qr/t
2500000	76114506.8	0.2	329.4759	134.633849	3.806E+13	3.806E+10	282672252.4

Para m=2.5E+6			
r	A	qR Hidrógeno	qR Propano
500	3141632	167.860601	89.976246
1000	12566528	41.9651503	22.494061
1500	28274688	18.6511779	9.9973606
2000	50266112	10.4912876	5.6235153
2500	78540800	6.71442405	3.5990498
3000	1.13E+08	4.66279448	2.4993402
3500	1.54E+08	3.42572655	1.8362499
4000	2.01E+08	2.62282189	1.4058788
4500	2.54E+08	2.0723531	1.1108178
5000	3.14E+08	1.67860601	0.8997625

Cálculo de nivel de flujo de calor manteniendo la distancia fija y variando la masa.

Para una distancia de 1Km.

Temp. De almacenamiento [K]= 260

r= 1000

Po= 0.4 Mpa

Fracción de radiación= 20%

m	Hc	n	r	t	Qr [J]	Qr [KW*s]	Qr/t	A	qR
0.001	142000000	0.2	2.67	1.09	28400000	28400	26078.972	12566528	0.002
0.01	142000000	0.2	5.66	2.31	2.84E+08	284000	122826.04	12566528	0.01
0.02	142000000	0.2	7.1	2.9	5.68E+08	568000	195831.99	12566528	0.016
0.03	142000000	0.2	8.1	3.31	8.52E+08	852000	257272.32	12566528	0.02
0.04	142000000	0.2	8.9	3.64	1.14E+09	1136000	312231.59	12566528	0.025
0.05	142000000	0.2	9.58	3.91	1.42E+09	1420000	362825.06	12566528	0.029
0.1	142000000	0.2	12	4.91	2.84E+09	2840000	578482.81	12566528	0.046
0.2	142000000	0.2	15.1	6.16	5.68E+09	5680000	922324.29	12566528	0.073
0.3	142000000	0.2	17.2	7.03	8.52E+09	8520000	1211694.3	12566528	0.096
0.4	142000000	0.2	18.9	7.73	1.14E+10	11360000	1470540	12566528	0.117
0.5	142000000	0.2	20.3	8.31	1.42E+10	14200000	1708823.8	12566528	0.136
1	142000000	0.2	25.5	10.4	2.84E+10	28400000	2724522.9	12566528	0.217
1.5	142000000	0.2	29.1	11.9	4.26E+10	42600000	3579314.6	12566528	0.285
2	142000000	0.2	32	13.1	5.68E+10	56800000	4343938.3	12566528	0.346
2.5	142000000	0.2	34.4	14.1	7.1E+10	71000000	5047822.6	12566528	0.402
3	142000000	0.2	36.5	14.9	8.52E+10	85200000	5706805.4	12566528	0.454
4	142000000	0.2	40.1	16.4	1.14E+11	1.14E+08	6925909.9	12566528	0.551
5	142000000	0.2	43.2	17.6	1.42E+11	1.42E+08	8048172.4	12566528	0.64
10	142000000	0.2	54.2	22.1	2.84E+11	2.84E+08	12831885	12566528	1.021
15	142000000	0.2	61.8	25.3	4.26E+11	4.26E+08	16857760	12566528	1.341
20	142000000	0.2	67.9	27.8	5.68E+11	5.68E+08	20458964	12566528	1.628
25	142000000	0.2	73.1	29.9	7.1E+11	7.1E+08	23774100	12566528	1.892
50	142000000	0.2	91.7	37.5	1.42E+12	1.42E+09	37905067	12566528	3.016
100	142000000	0.2	115	47	2.84E+12	2.84E+09	60435269	12566528	4.809
150	142000000	0.2	131	53.7	4.26E+12	4.26E+09	79396229	12566528	6.318
300	142000000	0.2	165	67.3	8.52E+12	8.52E+09	126588153	12566528	10.07
500	142000000	0.2	195	79.5	1.42E+13	1.42E+10	178524273	12566528	14.21
1000	142000000	0.2	244	99.8	2.84E+13	2.84E+10	284636415	12566528	22.65
2000	142000000	0.2	306	125	5.68E+13	5.68E+10	453820017	12566528	36.11

Para una distancia de 1.5 Km.

Temp. De almacenamiento [K]= 260

r= 1500

Po= 0.4 Mpa

Fracción de radiación= 20%

m	Hc	n	r	t	Qr [J]	Qr [KW*s]	Qr/t	A	qR
1	142000000	0.2	2.67	1.09	28400000	28400	26078.972	28274688	9E-04
10	142000000	0.2	5.66	2.31	2.84E+08	284000	122826.04	28274688	0.004
20	142000000	0.2	7.1	2.9	5.68E+08	568000	195831.99	28274688	0.007
30	142000000	0.2	8.1	3.31	8.52E+08	852000	257272.32	28274688	0.009
40	142000000	0.2	8.9	3.64	1.14E+09	1136000	312231.59	28274688	0.011
50	142000000	0.2	9.58	3.91	1.42E+09	1420000	362825.06	28274688	0.013
100	142000000	0.2	12	4.91	2.84E+09	2840000	578482.81	28274688	0.02
200	142000000	0.2	15.1	6.16	5.68E+09	5680000	922324.29	28274688	0.033
300	142000000	0.2	17.2	7.03	8.52E+09	8520000	1211694.3	28274688	0.043
400	142000000	0.2	18.9	7.73	1.14E+10	11360000	1470540	28274688	0.052
500	142000000	0.2	20.3	8.31	1.42E+10	14200000	1708823.8	28274688	0.06
1000	142000000	0.2	25.5	10.4	2.84E+10	28400000	2724522.9	28274688	0.096
1500	142000000	0.2	29.1	11.9	4.26E+10	42600000	3579314.6	28274688	0.127
2000	142000000	0.2	32	13.1	5.68E+10	56800000	4343938.3	28274688	0.154
2500	142000000	0.2	34.4	14.1	7.1E+10	71000000	5047822.6	28274688	0.179
3000	142000000	0.2	36.5	14.9	8.52E+10	85200000	5706805.4	28274688	0.202
4000	142000000	0.2	40.1	16.4	1.14E+11	1.14E+08	6925909.9	28274688	0.245
5000	142000000	0.2	43.2	17.6	1.42E+11	1.42E+08	8048172.4	28274688	0.285
10000	142000000	0.2	54.2	22.1	2.84E+11	2.84E+08	12831885	28274688	0.454
15000	142000000	0.2	61.8	25.3	4.26E+11	4.26E+08	16857760	28274688	0.596
20000	142000000	0.2	67.9	27.8	5.68E+11	5.68E+08	20458964	28274688	0.724
25000	142000000	0.2	73.1	29.9	7.1E+11	7.1E+08	23774100	28274688	0.841
50000	142000000	0.2	91.7	37.5	1.42E+12	1.42E+09	37905067	28274688	1.341
100000	142000000	0.2	115	47	2.84E+12	2.84E+09	60435269	28274688	2.137
150000	142000000	0.2	131	53.7	4.26E+12	4.26E+09	79396229	28274688	2.808
300000	142000000	0.2	165	67.3	8.52E+12	8.52E+09	126588153	28274688	4.477
500000	142000000	0.2	195	79.5	1.42E+13	1.42E+10	178524273	28274688	6.314
1000000	142000000	0.2	244	99.8	2.84E+13	2.84E+10	284636415	28274688	10.07
2000000	142000000	0.2	306	125	5.68E+13	5.68E+10	453820017	28274688	16.05